

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**Departamento de Tecnología Electrónica**

**Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones esp. Sistemas de  
Telecomunicación**

**Proyecto de Fin de Carrera**

***Caracterización de conmutadores  
basados en fibras ópticas de plástico y  
cristal líquido para redes en el hogar***

**Autor: Antonio José Marín del Toro**

**Director: José Francisco Algorri**

## Agradecimientos

El presente proyecto está dedicado a mis padres, Juan Antonio y Josefina, por el gran esfuerzo que han realizado para mi formación y educación y por su gran apoyo incondicional durante todos estos años. También para mi hermano, Juan Jesús, por ser el mejor y siempre estar ahí. Sin ellos nunca habría llegado hasta donde he llegado.

A mis tíos, Encarna y Manolo, por acogerme mis primeros años en Madrid y tratarme y apoyarme como a un hijo más. Y a mi primo Manolo por tratarme como a un hermano.

A mi abuela y mi abuelo, Justa y José, porque han sido más que unos padres para mí y siempre han compartido su sabiduría y bondad conmigo.

A mi primo Felipe por ser mi segundo hermano, por compartir conmigo tantas aficiones y por su compañía todos estos años.

A esa persona tan especial para mí, Julija, mi mejor amiga, compañera, cómplice, amor de mi vida, que me ha aguantado en mis peores momentos y me ha dado todo su apoyo y fuerzas para seguir hacia delante.

Al resto de mi familia, tíos y primos por ser tan geniales y especiales.

A Pedro Contreras y Francisco Algorri, directores de este proyecto, por haberme ayudado tanto, por haber puesto a mi alcance todo lo necesario para seguir adelante y haber tenido tanta paciencia conmigo. Sin su guía el desarrollo de este proyecto no hubiese sido posible.

Al departamento de Tecnología Electrónica, por esos estupendos laboratorios en los que es un placer trabajar.

A mis amigos de la Universidad, Santi, Miguel, Bea, Carlos, María, “el Killer”, con los que he compartido tanto tiempo en la universidad, prácticas, trabajos, risas, estrés, comidas, fiestas.

A mis amigos Roberto, Juli, Dani, Carpanta, por esas quedadas desestresantes que me hacen desconectar y a mi equipo de futbol sala por esos partidos de los sábados.

A mis amigos de la Erasmus, Javi, Inés, Santi, Nacho, Álvaro, Heydi, Edu, Fran, Traver, Antonio, Veronika, Jerome, Can, Helge, Marco, Francesco, por haberme hecho disfrutar y haberme enseñado tanto durante mi estancia en el extranjero.

A mis antiguos compañeros de piso, Virginia, Jorge, Hugo, Bea, por haber compartido tantas comidas y tantos buenos momentos conmigo.

A mis amigos de Murcia, a los que cada vez veo menos pero que han sido una parte muy importante de mi vida.

A mis amigos de la playa, José Antonio y Alberto con los que he disfrutado cada uno de mis veranos, esas estupendas barbacoas y esos refrescantes baños.

Y para acabar, agradecer a todas las personas que durante todo este tiempo han formado parte de mi vida y han influido en mí y cuyo resultado es lo que hoy en día soy.

# Índice General

<b>1. Introducción.....</b>	<b>13</b>
1.1    Objetivos de este proyecto .....	15
1.2    Contenido y organización del proyecto .....	16
<b>2. Definición de los componentes ópticos y del banco de trabajo.....</b>	<b>18</b>
2.1    Componentes opticos .....	18
2.1.1    Fibra Óptica .....	18
2.1.2    Pérdidas de la Fibra Óptica.....	24
2.1.3    Polarizadores .....	32
2.1.4    Divisores Polarizadores de Haz (Polarizing Beam Splitters) .....	34
2.1.5    Lentes .....	36
2.1.6    Cristales Líquidos .....	37
2.1.7    Conmutadores ópticos basados en LC .....	39
2.1.8    Fuentes Ópticas .....	42
2.1.9    Fotodetectores.....	45
2.1.10    Medidor de Potencia Óptica .....	46
2.2    Descripción del Banco de Caracterización Óptica.....	47
<b>3. Caracterización de Polarizadores .....</b>	<b>48</b>
3.1    Componentes Empleados.....	48
3.2    Montaje experimental .....	50
3.3    Resultados de Caracterización de los Polarizadores .....	51
3.3.1    Medidas con Fuente Láser Rojo .....	52
3.3.2    Medidas con Fuente Láser Verde .....	56
3.3.3    Medidas con Fuente a Longitud de Onda 850 nm.....	59
3.3.4    Medidas con Fuente a Longitud de Onda 1300 nm.....	61
3.3.5    Comparativa entre Polarizadores .....	63
<b>4. Caracterización de Polarizing Beam Splitters .....</b>	<b>66</b>
4.1    Componentes Empleados.....	66
4.2    Montaje Experimental.....	67
4.3    Resultados de Caracterización de los PBS .....	68
4.3.1    Medidas con Fuente Láser Rojo .....	71
4.3.2    Medidas con Fuente Láser Verde .....	72
4.3.3    Medidas con Fuente a Longitud de Onda 850 nm.....	73
4.3.4    Medidas con Fuente a Longitud de Onda 1300 nm.....	75
4.3.5    Comparativa entre PBS .....	77
<b>5. Caracterización de Cristales Líquidos.....</b>	<b>79</b>
5.1    Componentes Empleados.....	79



5.2	Montaje Experimental.....	80
5.3	Procedimiento de Caracterización de LC .....	81
5.3.1	Medidas Cristal Líquido .....	82
<b>6.</b>	<b>Conmutador Óptico basado en cristal líquido.....</b>	<b>86</b>
6.1	Conmutador Óptico Multifunción basado en LC .....	86
6.2	Componentes Empleados.....	88
6.3	Montaje Experimental.....	89
6.4	Resultados de Caracterización del Conmutador Óptico .....	91
6.4.1	Medidas con pareja células P2-P5 .....	92
6.4.2	Medidas con pareja células P3-P8 .....	94
6.4.3	Medidas con pareja células P1-P7 .....	96
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>	<b>99</b>
7.1	Conclusiones .....	99
7.2	Trabajos Futuros .....	100
	<b>Referencias .....</b>	<b>102</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Tendencia en las redes ópticas. ....	14
Figura 2.1 Estructura de una fibra óptica. ....	19
Figura 2.2 Esquema de la Ley de Snell. ....	19
Figura 2.3 Cono de aceptación y Ángulo Crítico de la fibra. ....	20
Figura 2.4 Tipos de fibra óptica.....	22
Figura 2.5 Curva típica atenuación fibra y mecanismos de pérdidas. ....	25
Figura 2.6 Atenuación de GIPOF con respecto a la longitud de onda. ....	28
Figura 2.7 Comparativa de POF multinúcleo y POF de núcleo único. ....	28
Figura 2.8 Red Óptica Pasiva (PON). ....	31
Figura 2.9 Arquitectura detallada entre la OLT y la ONU.....	32
Figura 2.10 Funcionamiento básico de un polarizador lineal.....	33
Figura 2.11 Haz de luz bloqueado. ....	33
Figura 2.12 Imagen Cubo PBS.....	34
Figura 2.13 Comportamiento de un PBS.....	35
Figura 2.14 Tipos de lentes, (a) convexa y (b) cóncava. ....	36
Figura 2.15 Fases de un cristal líquido. ....	38
Figura 2.16 Foto real de una célula de cristal líquido. ....	39
Figura 2.17 Estado del arte de conmutadores RotPol basados en LC. ....	42
Figura 2.18 Emisión de luz en un LED. ....	42
Figura 2.19 Led Advanced Fiber Solutions (izqda) y Led Ratioplast Optoelectronics (dcha). ....	43
Figura 2.20 Espectro emitido por un LED y un LASER.....	44
Figura 2.21 Fotodetector PDA100A-EC de ThorLabs.....	45

Figura 2.22 Medidor de Potencia Óptica Rifocs modelo 555B.....	46
Figura 2.23 Esquema del banco de caracterización óptica. ....	47
Figura 3.1 Esquema del sistema completo para caracterización de polarizadores. ....	50
Figura 3.2 Foto real del sistema completo para caracterización de polarizadores. ....	50
Figura 3.3 Responsividad espectral del PDA100A-EC.....	53
Figura 3.4 Potencia de salida a 650 nm con ambos medidores de potencia.....	55
Figura 3.5 Pérdidas de inserción a 650 nm con fotodetector PDA100A-EC. ....	56
Figura 3.6 Foto real del montaje del sistema completo para 550 nm.....	56
Figura 3.7 Potencia de salida a 550 nm con Fotodetector PDA100A-EC y medidor RIFOCS. ....	58
Figura 3.8 Pérdidas de inserción a 550 nm con fotodetector PDA100A-EC. ....	59
Figura 3.9 Fotografías del banco de trabajo para caracterización de polarizadores a 1300nm. ....	62
Figura 3.10 Recopilación pérdidas inserción polarizadores a todas las lambdas. ....	65
Figura 4.1 Esquema del sistema completo para caracterización de PBS. ....	68
Figura 4.2 Foto real montaje caracterización PBS a 550 nm. ....	72
Figura 4.3 Esquema caracterización PBS con haz de luz no coherente y lente colimada. .....	76
Figura 5.1 Esquema del montaje para caracterización de cristales líquidos. ....	80
Figura 5.2 Potencia salida frente a la tensión aplicada LC P5. ....	83
Figura 5.3 Potencia salida frente a la tensión aplicada LC P2. ....	85
Figura 6.1 Estructura del Conmutador Óptico basado en cristal líquido.....	86
Figura 6.2 Imagen del Conmutador Óptico realizado en el banco de trabajo. ....	90
Figura 6.3 Diferentes vistas del montaje realizado en el banco de caracterización. ....	91
Figura 6.4 Función conmutador 2x2, en estados OFF y ON del LC.....	92
Figura 6.5 Transmisión óptica célula n 3 puerto 2b y salidas 1 y 2 a diferentes frecuencias. ....	93



Figura 6.6 Transmisión óptica célula n 4 puerto 2b y salidas 1 y 2 a diferentes frecuencias. ....	95
Figura 6.7 Transmisión óptica célula n 1 puerto 2b y salidas 1 y 2 a diferentes frecuencias. ....	97



## Índice de Tablas

Tabla 3.1 Resumen medidas obtenidas para los distintos polarizadores a 650 nm. ....	54
Tabla 3.2 Resumen medidas obtenidas para los distintos polarizadores a 550 nm. ....	57
Tabla 3.3 Recopilación medidas para distintas fuentes y distintos polarizadores a 850 nm. ....	60
Tabla 3.4 Resumen medidas para distintos polarizadores a 1300 nm. ....	62
Tabla 3.5 Pérdidas de Inserción de cada polarizador para cada longitud de onda. ....	63
Tabla 4.1 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.....	71
Tabla 4.2 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.....	73
Tabla 4.3 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.....	74
Tabla 4.4 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.....	75
Tabla 4.5 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.....	76
Tabla 5.1 Resumen IL para los tres píxeles de la célula P5. ....	82
Tabla 5.2 Resumen IL para los tres píxeles de la célula P2. ....	84
Tabla 6.1 Características de las células de LC fabricadas. ....	88
Tabla 6.2 CT tipo célula no 3 a distintas longitudes de onda. ....	94
Tabla 6.3 Crosstalk, tipo célula no. 4 a distintas longitudes de onda. ....	96
Tabla 6.4 Crosstalk tipo célula no 1 a distintas longitudes de onda. ....	98

## Glosario de Términos

Abreviatura	Término Castellano	Término Inglés
<b>AN</b>	Apertura Numérica	Numerical Aperture
<b>BW</b>	Ancho de Banda	Bandwidth
<b>CT</b>	Diafonía	Crosstalk
<b>FB</b>	Retroalimentación Distribuida	Distributed Feedback
<b>DMT</b>	Modulación Discreta Multitono	Discrete Multitone Modulation
<b>D2B</b>	Bus Digital Doméstico	Digital Domestic Bus
<b>ELED</b>	LED de borde emisor	Edge Light Emitting Diode
<b>ER</b>	Relación de contraste	Extinction Ratio
<b>FTTB</b>	Fibra hasta el edificio	Fiber To The Building
<b>FTTH</b>	Fibra hasta casa	Fiber To The Home
<b>GI-POF</b>	Fibra Óptica de Plástico de Índice Gradual	Graded Index- Polymer Optical Fiber
<b>HDTV</b>	Televisión en alta definición	High Definition TV
<b>IDB</b>	Bus de Datos Inteligente	Intelligent Data Bus
<b>IL</b>	Pérdidas de Inserción	Insertion Loss
<b>LAN</b>	Red de Área Local	Local Area Network
<b>LASER</b>	Luz Amplificada por Emisión Estimulada de Radiación	Light Amplified by Stimulate Emission of Radiation
<b>LED</b>	Diodo Emisor de Luz	Light-Emitting Diode
<b>LC</b>	Cristal Líquido	Liquid Crystal

<b>LCD</b>	Dispositivo de Cristal Líquido	Liquid Crystal Display
<b>MM</b>	Multimodo	Multimode
<b>MOST</b>	Media Oriented System Transport	Sistemas de Transporte Orientado al Medio
<b>NLC</b>	Cristal Líquido Nemático	Nematic Liquid Crystal
<b>OBS</b>	Conmutación de Ráfagas Ópticas	Optical Burst Switching
<b>OCS</b>	Conmutación de Circuitos Ópticos	Optical Circuit Switching
<b>OLT</b>	Terminador de Línea Óptica	Optical Line Terminator
<b>ONT</b>	Terminal de Red Óptica	Optical Network Terminal
<b>ONU</b>	Unidad de Red Óptica	Optical Network Unit
<b>OPS</b>	Conmutación de Paquetes Ópticos	Optical Packet Switching
<b>PBS</b>	Polarizador Divisor de Haz	Polarizer Beam Splitter
<b>PDLC</b>	Cristal Líquido de Polímero Disperso	Polymer Dispersed Liquid Crystal
<b>PON</b>	Red Óptica Pasiva	Passive Optical Network
<b>POF</b>	Fibra Óptica de Plástico	Polymer Optical Fiber
<b>SLED</b>	LED de superficie emisora	Surface Light Emitting Diode
<b>SM</b>	Monomodo	Single Mode
<b>SSFLC</b>	Cristal Líquido Ferroeléctrico con Superficie Estabilizada	Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal
<b>TN-LC</b>	Cristal Líquido Nemático Torsionado	Twisted Nematic Liquid Crystal



<b>VCSEL</b>	Láser de emisión superficial con cavidad vertical	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
<b>WDM</b>	Multiplexación por Longitud de Onda	Wavelength Division Multiplexing
<b>WGP</b>	Polarizador de Rejilla	Wired Grid Polarizer
<b>xDSL</b>	Tecnología DSL	Digital Subscriber Line Technology

# 1. Introducción

Desde hace mucho tiempo, gracias al desarrollo de las telecomunicaciones es posible contactar con alguien o saber que está ocurriendo en cualquier parte del mundo sin apenas mover un dedo.

En los últimos años, se está produciendo una enorme expansión del tráfico de internet y un aumento en la demanda de aplicaciones multimedia de banda ancha, tales como vídeo bajo demanda, vídeo en streaming, televisión en alta definición (HDTV), etc. Este hecho, ha provocado un incremento en las necesidades de capacidad de las redes de transporte, troncales y de acceso para poder soportar los nuevos requisitos de ancho de banda.

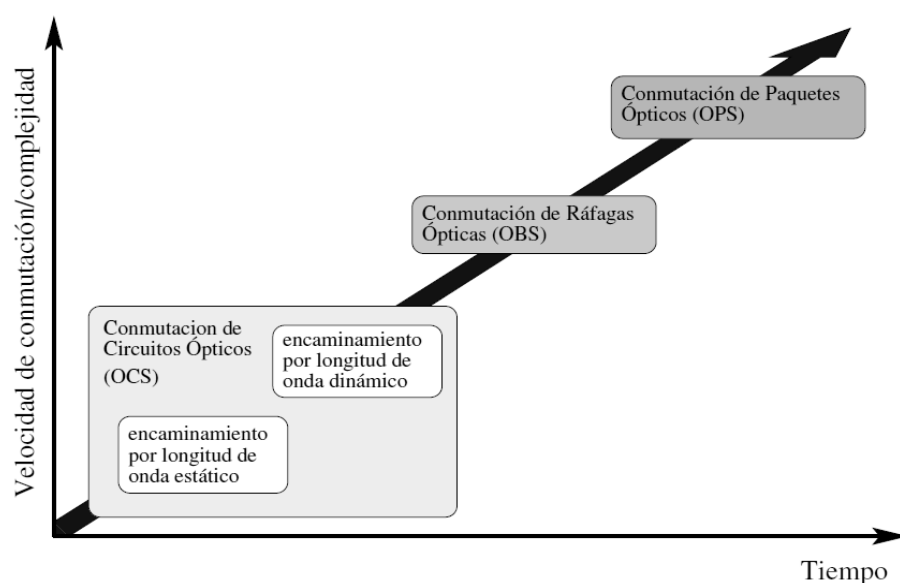
En este punto, entra en juego la investigación en tecnologías y redes de comunicaciones ópticas, debido a la fiabilidad, y al gran ancho de banda que la fibra óptica ofrece. La fibra óptica está sustituyendo al cable de cobre en la transmisión de datos de largo alcance. Posee importantes ventajas que la diferencian del resto de medios de transmisión. Por ejemplo, mayor ancho de banda para la transmisión, inmunidad ante interferencias electromagnéticas y menor tamaño. Además, el uso de luz como sistema de transmisión permite su empleo en entornos peligrosos debido a su naturaleza inerte. Otra de las ventajas y quizás de las más importantes, es su coste. El material básico utilizado para su fabricación es la sílice. La sílice es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre, y en consecuencia, también de los más baratos. Si en un principio las fibras ópticas tenían un precio más alto que los cables de cobre, hoy en día ya no ocurre lo mismo. Los procesos de fabricación se han abaratado considerablemente, así que una fibra óptica de sílice puede resultar incluso más económica que un cable de cobre convencional. [APT]

Cabe mencionar, también, el caso de la fibra óptica de plástico. Su uso está cada vez más extendido debido a sus ventajas respecto de la convencional en pequeñas distancias (menos de 100m). La principal ventaja es su facilidad de instalación ya que posee un núcleo de mayor tamaño.

Tras la aparición de nuevos desarrollos de fibra de índice gradual (GI-POF) se ha visto fuertemente impulsada. Esta nueva tecnología incrementa de forma considerable la capacidad de transmisión a altas velocidades y disminuyen las pérdidas de inserción. Se han reportado anchos de banda superiores a 40 Ghz mediante el empleo de este tipo de fibras. Asimismo, la GI-POF posee bajas pérdidas de transmisión no sólo a 650 nm como la POF convencional, sino a 850 nm y a 1300 nm. Unido a todo lo anterior, se encuentra su adhesión a distintos estándares tras su consolidación en distintos sectores industriales, tal y como pueden ser la industria automovilística o las comunicaciones en redes domésticas. [JianYu]

Ejemplos de su cada vez más fuerte presencia los vemos en multitud de fabricantes de coches que optan por incluir fibra óptica de plástico en los sistemas de entretenimiento y seguridad de sus vehículos. Por ejemplo, en Japón donde las fibras de este tipo se están introduciendo en redes domóticas, cableando los hogares con GI-POF con un gran ancho de banda o incluso en Europa con la aparición de la FTTH.

En la actualidad, la tendencia clara es migrar las redes ópticas con conmutación de circuitos hacia redes que conmuten directamente paquetes en el dominio óptico, eliminándose la conversión entre los dominios óptico y electrónico, es decir, redes todo-ópticas.



**Figura 1.1 Tendencia en las redes ópticas.**

Para conseguir el traspaso del transporte al dominio óptico es necesario eliminar las conversiones entre los dominios electrónico y óptico, por lo que la tendencia a largo plazo es la conmutación de paquetes ópticos. Las tecnologías de conmutación de ráfagas ópticas y paquetes ópticos están aún en fase de investigación y desarrollo así que aún no son aplicables en la práctica. Ver figura 1.1 [CCA]

Mientras tanto, para poder explotar todo el potencial que a día de hoy ofrece la fibra óptica y la WDM (multiplexación por longitud de onda) se deben desarrollar dispositivos y tecnologías que permitan la multiplexación y control de los distintos haces de luz, como multiplexores o conmutadores ópticos.

## 1.1 Objetivos de este proyecto

El presente proyecto consiste en caracterizar un conmutador basado en fibra óptica de plástico y cristal líquido a través de la caracterización individual de sus componentes (cristales líquidos, polarizadores, PBS, etc.) para distintas longitudes de onda. Para poder desarrollar satisfactoriamente este proyecto se plantean una serie de objetivos.

Los objetivos planteados en este trabajo son:

- Determinar el **tipo de montaje** necesario para caracterizar los diferentes elementos ópticos.
- Realización del montaje necesario para **caracterizar polarizadores, PBS y cristales líquidos**.
- **Estudiar la respuesta** de estos elementos para **distintas longitudes de onda**: rojo, verde e infrarrojo
- **Establecer que elementos son más adecuados** para unas longitudes de onda concretas, las potencias alcanzables, las pérdidas de inserción y el crosstalk para cada uno de ellos.
- Usando los datos anteriores, se pretende **diseñar un conmutador óptico multifunción** basado en cristal líquido, capaz de trabajar en un amplio rango de longitudes de onda y **adecuado tanto para redes POF como GI-POF**.

## 1.2 Contenido y organización del proyecto

En el presente proyecto, se estudian diferentes elementos ópticos juntos y por separado a través de un proceso experimental para comprobar su comportamiento ante distintas longitudes de onda y finalmente son incluidos en un sistema completo para analizar su respuesta.

De tal forma, en el Capítulo 2 se presenta una serie de datos y conocimientos teóricos de los principales componentes ópticos utilizados en el laboratorio para dar a conocer sus características más importantes y sus funcionalidades.

Así, por ejemplo, se aporta información de la fibra óptica, de polarizadores y polarizer beam splitter (PBS), de las lentes y sus tipos, de medidores de potencia y fotodetectores, así como de fuentes ópticas y cristales líquidos. Una vez comprendidos los fundamentos y características teóricas de las distintas piezas, se procede a describir el banco de caracterización óptica que fue utilizado como base para el experimento.

En el Capítulo 3, se enfoca en la caracterización de los polarizadores. Se describen los componentes ópticos empleados así como el montaje de caracterización realizado. Finalmente se exponen y analizan los resultados obtenidos.

El Capítulo 4, define los mismos puntos que el capítulo anterior pero, en este caso, referidos a diferentes tipos de Polarizers Beam Splitters (PBS).

En el Capítulo 5, se caracterizan dos células de cristal líquido. Al igual que en capítulos anteriores se presentan los componentes empleados, el montaje llevado a cabo y los resultados obtenidos.

En el Capítulo 6, se propone un conmutador óptico avanzado basado en cristal líquido capaz de trabajar en un amplio rango de longitudes de onda y adecuado tanto para redes POF como GI-POF. Se explica su funcionamiento y estructura y se profundiza en el experimento realizado y los resultados obtenidos.





Por último, en el Capítulo 7 se extraen las conclusiones finales del trabajo desarrollado en este proyecto, así como posibles futuros trabajos que puedan derivarse del estudio realizado.

## **2. Definición de los componentes ópticos y del banco de trabajo**

En este capítulo, se pretende dar una visión general, a modo teórico, de las características de cada uno de los componentes que se han empleado en la implementación física realizada en el banco de trabajo del laboratorio, así como del funcionamiento de los mismos. De igual modo se describe brevemente la constitución del banco de trabajo. Es importante destacar que cada una de las caracterizaciones emplea una serie de componentes determinados y una configuración específica del banco de trabajo. Por este motivo, en cada una de las caracterizaciones se introducirá tanto los componentes empleados como la configuración del montaje experimental.

### **2.1 Componentes ópticos**

Paso a paso se irán describiendo los diferentes elementos ópticos empleados en el montaje, tales como fibra óptica, celdas de cristal líquido, divisores polarizadores de haz o PBS (Polarizing Beam Splitters), polarizadores, lentes, sensores y detectores y fuentes ópticas.

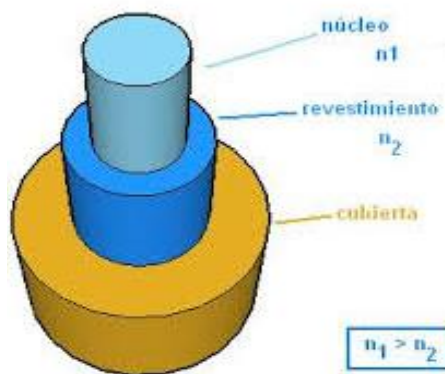
#### **2.1.1 Fibra Óptica**

La fibra óptica es un medio de transmisión físico por el que se transportan señales digitales de datos en forma de pulsos modulados de luz. Habitualmente consiste en un filamento cilíndrico flexible, hecho de vidrio o plástico. Un láser o un led pueden generar los haces de luz que atraviesan la fibra y que se propagan a través de ella debido a las sucesivas reflexiones que se producen en su interior. Son recibidos a la salida por un detector de luz, normalmente un fotodiodo o fotodetector.

Los conductores de fibra óptica que habitualmente se usan en transmisión de datos son muy finos, cuyo núcleo varía entre los 8 y los 100  $\mu\text{m}$ , y el revestimiento entre 125 y 140  $\mu\text{m}$ . Aunque la fibra óptica se emplea habitualmente en redes de datos,

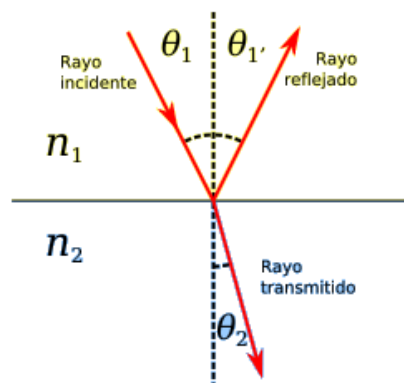
abarca otro tipo de aplicaciones tales como la conducción de la luz solar hacia el interior de edificios, fabricación de sensores de distinto tipo, medicina, iluminación, etc.

El cable de fibra óptica se constituye principalmente de un núcleo rodeado de un revestimiento, cada cual con un índice de refracción ( $n$ ) diferente, siendo necesario que  $n_1 > n_2$  para que la fibra óptica pueda confinar la luz en el núcleo y guiarla. En la figura siguiente, figura 2.1, podemos ver las diferentes partes de un cable de fibra óptica. [TuN]



**Figura 2.1 Estructura de una fibra óptica.**

El principio que explica las comunicaciones a través de fibras ópticas es la Ley de Snell. Cuando un haz de luz incide sobre la superficie de separación entre dos medios, parte de la energía se refleja volviendo al mismo medio del cual provenía y parte de la energía se refracta. Se puede observar en la figura 2.2 [FuH]



**Figura 2.2 Esquema de la Ley de Snell.**

donde,

$n_1$ = índice de refracción del material 1 (adimensional)

$n_2$ = índice de refracción del material 2 (adimensional)

$\theta_1$ = es el ángulo de incidencia (grados)

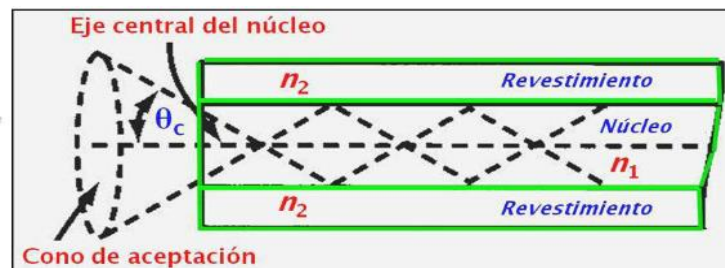
$\theta_2$  = es el ángulo de refracción (grados)

De donde resulta la ecuación 2.1:

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad [2.1]$$

En el núcleo de la fibra óptica los rayos de luz pueden incidir en varios ángulos pero la reflexión interna total se produce para aquellos que inciden con un ángulo mayor que el crítico (ángulo de incidencia ( $\theta_1$ ) para el que el rayo se propaga a lo largo de la frontera entre ambos medios). Por tanto, es el fenómeno de reflexión total interna el que hace que los rayos atraviesen la fibra de un extremo a otro sin escapar de la misma. [ApCE], [Sofh07]

La posición de la fuente de luz debe ser la adecuada para que todos los rayos entren por un cono de aceptación imaginario, figura 2.3. Si el ángulo del cono de aceptación, tomado a partir del eje de la fibra, es igual que el ángulo crítico ( $\theta_c$ ), los rayos se propagarán por el núcleo. El cono de aceptación define la apertura numérica AN de la fibra. Este es un número adimensional que indica la gama de ángulos dentro de la cual la fibra puede emitir o aceptar luz. [ApCE], [Focs02]



**Figura 2.3 Cono de aceptación y Ángulo Crítico de la fibra.**

donde,

$$AN = \text{sen } \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad [2.2]$$

Las fibras ópticas se pueden clasificar en dos tipos, monomodal y multimodal. Para diferenciarlas hay que atender a algunos de sus parámetros estructurales, como el radio del núcleo o los índices de refracción del núcleo y el revestimiento, así como a la longitud de onda empleada. La frecuencia normalizada  $V$  es el valor, adimensional, que define la línea divisoria entre estas dos clases de fibra. Se define según la Ecuación 2.3:

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad [2.3]$$

donde  $n_1$  es el índice de refracción del núcleo,  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento,  $\rho$  es el radio del núcleo y  $\lambda$  es la longitud de onda del rayo de luz utilizado.

Si el valor de  $V$  es menor que 2.405, por la fibra sólo se propaga un modo y por tanto, ésta será de tipo monomodal. Sin embargo, si el valor de la frecuencia normalizada es mayor que 2.405, la fibra será de tipo multimodal, ya que se propagan por ella varios modos. [Ku07], [SnLv].

A continuación, se exponen brevemente los dos tipos de fibra anteriormente comentados:

- **Multimodo de índice escalonado (MM):** se propagan varios modos. La densidad del núcleo permanece constante a lo largo de toda su estructura. En la frontera entre núcleo y cubierta se produce un cambio abrupto a una densidad menor. Este tipo de fibra ya prácticamente no se utiliza en telecomunicaciones.

- **Multimodo de índice gradual (MM):** se propagan varios modos. La densidad es mayor en el centro y va disminuyendo de forma gradual hacia los bordes. En la frontera el cambio es gradual. Este tipo de fibra se utiliza principalmente en redes LAN y aplicaciones industriales.
- **Monomodo (SM):** se propaga sólo un modo a través de la fibra. El diámetro del núcleo es mucho más pequeño y la diferencia de densidades también. Este tipo de fibra se utiliza para comunicaciones de larga distancia.

En la siguiente figura, figura 2.4, se puede observar los tipos de fibra mencionados: [ApMTO]

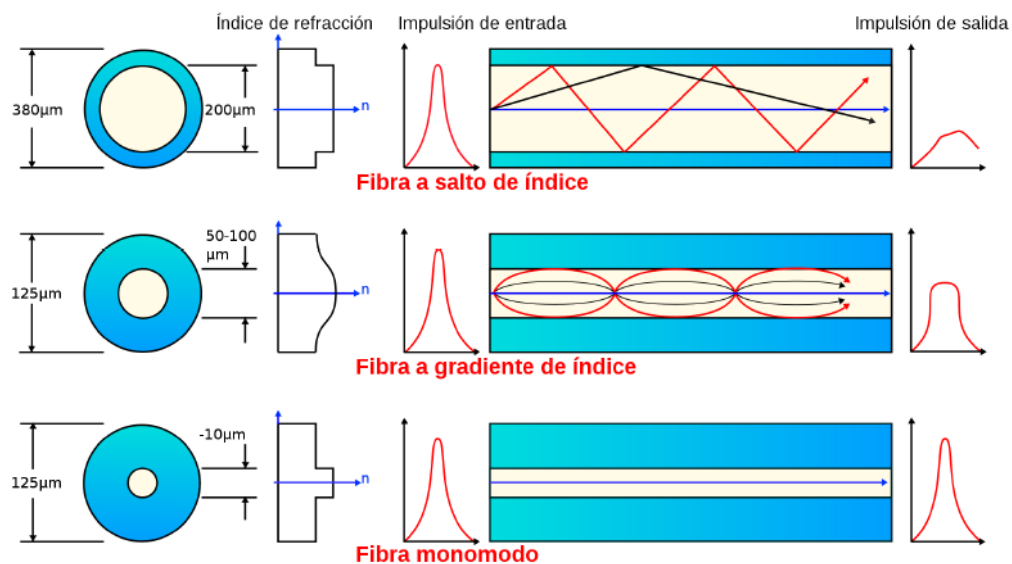


Figura 2.4 Tipos de fibra óptica.

La fibra óptica presenta muchas ventajas con respecto a otros medios de transmisión aunque también presenta algunas desventajas. [TEf], [WiFO]

Las principales ventajas son:

- **Inmunidad total a las perturbaciones de origen eléctrico y electromagnético.** No es necesario aislar los cables de fibra óptica de los cables eléctricos. Esto permite instalar más fácilmente los cables.

- **Gran ancho de banda.** Capacidad de transportar señales con un ancho de banda muy amplio (del orden del Ghz) a altas velocidades de transmisión de datos.
- **Atenuación muy pequeña.** Permite cubrir grandes distancias (más de 100 km) sin amplificadores ni regeneradores.
- **Pequeño tamaño.** Por tanto, ocupa poco espacio.
- **Gran flexibilidad y gran resistencia mecánica.** Resistencia a la tracción, lo que facilita la instalación, así como resistencia al calor, frío y corrosión.
- **No produce interferencias.** Las señales en los cables cercanos no se acoplan en entre ellas.
- **Alta confiabilidad.** La tasa de error de bits es muy pequeña.
- **Gran ligereza.** El peso es mucho menor en comparación con un cable convencional.
- **Insensibilidad a los parásitos.** Lo que es una propiedad interesante para entornos industriales.
- **Facilidad para localizar los cortes.** Gracias a la telemetría se puede detectar rápidamente el lugar y posterior reparación de la avería, simplificando así la tarea de mantenimiento.
- **Uso Seguro en Áreas Peligrosas.** Los enlaces de fibra óptica pueden ser usados para acoplar y transportar señales en áreas con atmósfera potencialmente peligrosa
- **Coste menor respecto al cobre.**

Las principales desventajas son:

- **Receptores y transmisores.** Los transmisores y receptores asociados a la fibra son más caros.
- **Reparaciones.** Los empalmes entre fibras son difíciles de realizar, lo que dificulta las reparaciones en caso de ruptura del cable.
- **La alta fragilidad de las fibras.**
- **Conversión electro-óptica.** Necesidad de realizar conversión del dominio eléctrico al óptico y viceversa.

## 2.1.2 Pérdidas de la Fibra Óptica

Las pérdidas en una fibra óptica se pueden clasificar, según su origen, en intrínsecas y extrínsecas: [APT02]

- **Pérdidas Intrínsecas:** Son aquellas pérdidas debidas a factores intrínsecos de la naturaleza de las fibras. Son inherentes al material de fabricación de la fibra, la sílice, y por tanto, existen unos límites físicos de los cuales es imposible descender. Es decir, no se pueden eliminar de manera total.
- **Pérdidas Extrínsecas:** Son aquellas pérdidas que provienen de todo aquello ajeno al material de la fibra, pero que aparece conjuntamente con el mismo en cualquier fibra objeto de estudio. Ejemplos de ello, son desde impurezas de otros elementos a defectos estructurales del material surgidos en el proceso de fabricación de la fibra. Estas pérdidas se pueden reducir o incluso casi hacerlas desaparecer mediante una cuidada fabricación.

Los factores esenciales que limitan las comunicaciones con fibras ópticas son los derivados de la absorción y de la dispersión (scattering) de la radiación óptica. La absorción procede únicamente del material que constituye la fibra, mientras que la dispersión se deriva tanto de éste como de las imperfecciones estructurales que puedan existir en la guía óptica.

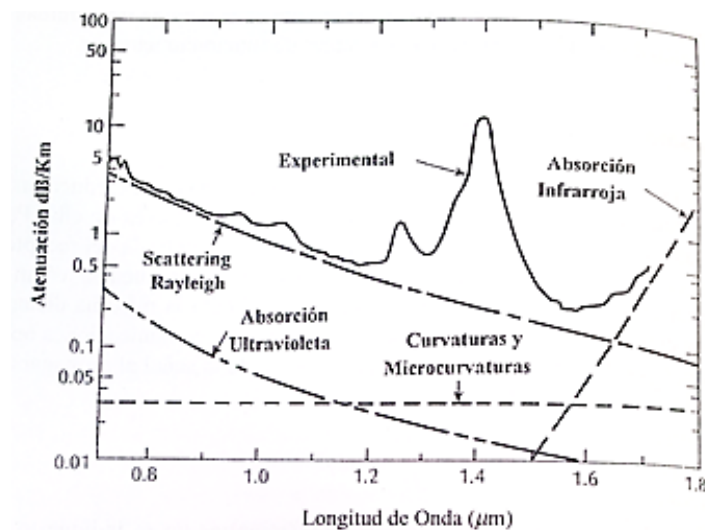
- **Atenuación:** es la pérdida de intensidad de la radiación en una fibra óptica. Depende de la longitud de onda de la señal y es la disminución de potencia de la señal óptica, en proporción inversa a la longitud de la fibra. La unidad utilizada para medir la atenuación en una fibra óptica es el decibelio (dB), aunque se suele expresar en dB/Km.
  - Los factores intrínsecos que influyen en la atenuación son, por un lado, *la absorción*, que hace que parte de la energía óptica se disipe debido a impurezas del material. Su efecto se hace notar especialmente en longitudes de onda bajas y en longitudes de onda de infrarrojo. Y por otro lado, *la dispersión (Scattering de Rayleigh)*, que se presenta como



reflexiones del material, debido a las irregularidades microscópicas surgidas durante el proceso de fabricación y que provoca que cuando un rayo de luz se está propagando choque contra estas impurezas, se disperse y se refleje.

- Los factores extrínsecos que influyen en la atenuación son, principalmente, las deformaciones mecánicas como las curvaturas y microcurvaturas. Éstas, propician que algunos rayos no se reflejen de manera total dentro del núcleo provocando una pérdida de luz. Y también, dentro de este grupo se encuentran las pérdidas producidas en conexiones, por desalineamiento o por acoplamiento, por ejemplo. [APT02], [ApMT]

En la siguiente figura, figura 2.5, se puede observar la curva de la constante de atenuación típica de una fibra óptica expresada en dB/Km en función de la longitud de onda y los diversos mecanismos de pérdidas y su dependencia espectral. [Cap98]



**Figura 2.5** Curva típica atenuación fibra y mecanismos de pérdidas.

- **Dispersión:** es la limitación en la capacidad de transmisión de una fibra óptica. Se puede clasificar en dos tipos:

- **Dispersión intermodal:** es la distorsión producida por la diferencia de velocidad entre distintos modos. Provoca un ensanchamiento del pulso y su magnitud es la diferencia entre el modo más rápido y el más lento. Sólo se produce en fibras multimodo.
- **Dispersión intramodal:** hace referencia a lo que puede suceder a cada uno de los modos que se propagan por la fibra. Este tipo de dispersión se produce en fibras multimodo y en fibras monomodo.

Dentro de ella, tenemos dos tipos: ***dispersión cromática o dispersión por el material*** que aparece debido a la coherencia espectral no ideal de la fuente de luz: distintas longitudes de onda se propagan a velocidades distintas. Y por otra parte, tenemos la ***dispersión por la guíaonda*** producida por las características geométricas de la fibra. Parte del campo que se genera por cada rayo propagado en la fibra se queda en el núcleo y otra parte penetra en la cubierta. El núcleo y la cubierta tienen diferentes índices de refracción que determina la velocidad de la luz en ellos, por lo que esta diferencia de velocidad conduce a un nuevo ensanchamiento temporal de los pulsos ópticos. [APT02], [ApMT]

## Fibra Óptica de Plástico

Como se menciona en anteriores apartados, cabe destacar un tipo especial de fibra óptica por sus características y posibles aplicaciones. Es el caso de la fibra óptica de plástico (POF- Plastic Optic Fiber).

La fibra óptica de plástico es un tipo de fibra óptica, compuesta principalmente de plástico. Su núcleo suele ser de polimetilmetacrilato, y el revestimiento de polímeros fluorutatos. Su núcleo es de gran tamaño, alrededor de 1 mm, entre 20 y 100 veces mayor que el de la fibra tradicional y una gran apertura numérica (AN 0,2-0,5).

Debido a su composición plástica, se presenta como una alternativa menos costosa a la fibra óptica tradicional, además de varias ventajas atribuibles con respecto a la fibra óptica tradicional y el mismo cobre. Una de sus características más importantes

es la gran flexibilidad que tiene, ya que soporta 20-25 mm de radio de curvatura. Sin embargo, hay que destacar que la fibra óptica de plástico se suele utilizar para realizar conexiones ópticas en distancias cortas (menos de 100 m), puesto que sus pérdidas son considerablemente mayores y su ancho de banda menor, que en la fibra convencional.

En sus inicios, las primeras fibras ópticas de plástico (POF de salto de índice) no tuvieron demasiado éxito, puesto que sus pérdidas eran muy elevadas (de hasta 1000dB/km). Tras el desarrollo de la POF de índice gradual y de las fibras perfluoradas, con la consiguiente disminución de la atenuación y el consiguiente aumento de ancho de banda, fue cuando diversas compañías y sectores de la industria empezaron a verla como una opción interesante para multitud de aplicaciones. No en vano, en 2007 se consiguió una tasa de 40 Gbps en enlaces de 200 m para el rango de 850 a 1550 nm utilizando POF perfluorada de índice gradual. Y en 2010, se consiguió una velocidad de 47,7 Gbps en un enlace de 100 m empleando el mismo tipo de fibra y una modulación DMT (Discrete Multitone Modulation). [JLT10], [Ofc07]

Al igual que ocurre con la fibra convencional, existen diferentes tipos de POF si se atiende al índice de refracción del núcleo:

- **Salto de índice:** Tienen una elevada Apertura Numérica lo que facilita el acoplamiento de la luz en la fibra, pero lo que implica también que se reduzca el BW y la velocidad de transmisión debido a la dispersión.
- **Índice gradual:** en inglés conocida como GI-POF. En este tipo de POF la dispersión modal es menor. Debido a las características del índice de refracción del núcleo los rayos que se propagan por la fibra se curvan antes de llegar a la interfaz entre el núcleo y el revestimiento. De esta forma, disminuye el camino recorrido y el tiempo que tardan en propagarse los rayos. En la siguiente figura 2.6 se muestra la atenuación típica de una GIPOF: [JianYu]

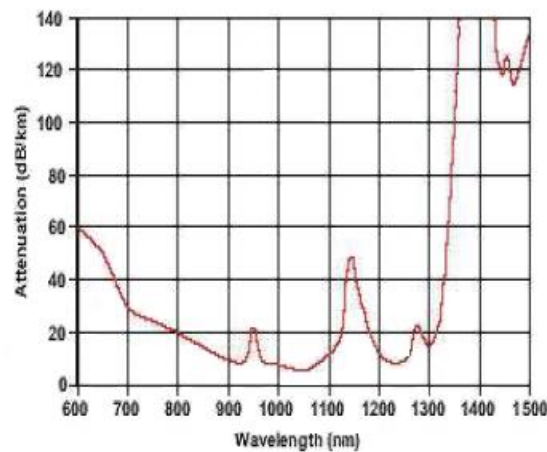


Figura 2.6 Atenuación de GIPOF con respecto a la longitud de onda.

- **Índice multiescalón:** el núcleo está formado por múltiples capas con diferentes índices de refracción. Este tipo de POF tiene la ventaja de ser muy fácil de fabricar además de presentar un rendimiento muy similar a las de índice gradual.

Por otra parte, existe otro tipo de POF llamadas **POF Multinúcleo**, ya que están formadas por más de un núcleo rodeado de un revestimiento. Sus núcleos son más pequeños que los de las POF convencionales, sin embargo, el conjunto de núcleos actúa como un único gran núcleo. Por este motivo, se mantienen las ventajas de facilidad de acoplamiento y manejo de las POF convencionales, además de una mayor capacidad de transmisión y unas menores pérdidas por curvatura en comparación con las POF tradicionales.

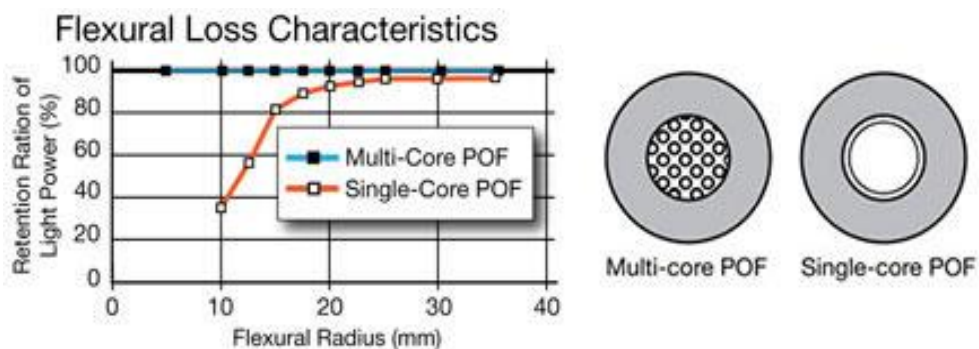


Figura 2.7 Comparativa de POF multinúcleo y POF de núcleo único.

En la anterior figura, figura 2.7, podemos observar la sección transversal de una fibra multinúcleo y de una fibra de un solo núcleo así como una comparativa de las pérdidas por curvatura entre ambos tipos. [iFO]

Como se ha comentado anteriormente, hoy en día, la fibra óptica de plástico se suele utilizar para realizar conexiones ópticas en distancias cortas. En este sentido, cada vez se pueden encontrar más sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica de vidrio en combinación con fibra de plástico en los últimos 100 m, ya que conforman una buena solución debido a las grandes ventajas de las fibras, a las que se unen las ventajas de la POF, tales como su fácil manejo o su bajo coste. [ZuA01]

Pero las aplicaciones de la POF no solo se limitan a las redes de comunicaciones, sino que gracias a sus características son varios los sectores de la industria que se han interesado por ella.

Las aplicaciones de las POF son innumerables: desde las más conocidas como las comunicaciones de datos, a otra serie de aplicaciones médicas, científicas e industriales que van desde la iluminación de una sonda de calibre 25 para la cirugía vítreo-retiniana, a la automatización de fábricas o el control industrial (PROFIBUS, PROFINET, Ethernet Industrial, SERCOS), sistemas de sensores para control de viento y sistemas de energía solar, aeronáutica, displays, y muchas aplicaciones más. [FOhoy]

En combinación con transmisores de bajo coste, constituyen una opción muy interesante para la implementación de conexiones de datos de corta distancia en edificios, redes del hogar, y en el interior de aviones, vehículos o incluso dispositivos electrónicos.

A continuación se analizan algunas de las aplicaciones y sectores en los que la POF se encuentra más extendida:

➤ **Industria Automovilística**

En la actualidad, cada vez se demandan más dispositivos electrónicos multimedia en el interior de vehículos, como reproductores multimedia, sistemas de navegación, sistemas de visión de contorno basados en cámaras o sistemas de reconocimiento de tráfico que avisan al conductor de peatones y vehículos cercanos e incluso señales de tráfico.

Las propiedades de la POF, tales como su flexibilidad y reducido peso, inmunidad frente a interferencias, gran ancho de banda, resistencia a altas temperaturas y reducido costo, han propiciado que en los últimos años se haya levantado un gran interés por su utilización en el campo de la industria automovilística.

La compañía DaimlerChrysler fue la primera que introdujo fibra óptica de plástico en sus coches, utilizando un bus de datos óptico llamado D2B (Digital Domestic Bus). Posteriormente, se creó el estándar MOST (Media Oriented System Transport), con tasas de 50-150 Mbps. En la actualidad, hay más de 120 modelos de vehículos de 16 fabricantes diferentes que incluyen este estándar, como por ejemplo: Mercedes Clase E y Clase S, Rolls Royce, Porsche Carrera y Cayenne, Saab 9.3, Audi A6 y A8, Volvo XC90 y V50, BMW Z4, Peugeot 807, etc.

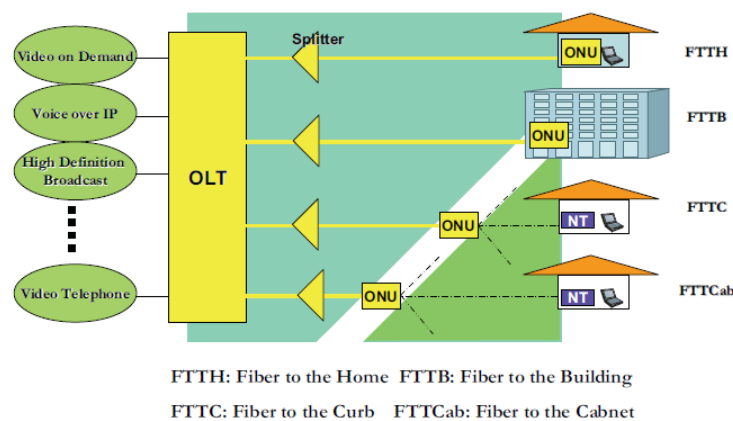
Más tarde, aparecen nuevos protocolos para salvaguardar la integridad de los datos en el caso de los sistemas de seguridad críticos de un automóvil (ByteFlight y FlexRay) y para cubrir la necesidad de mayores tasas de transmisión (protocolo IDB-1394, que permite transferencias de datos de entre 400-800 Mbit/s sobre POF).

En definitiva, las POF consiguen un interesante hueco en el sector de las comunicaciones de datos en el sector automovilístico, quedando abierta una línea de investigación para mejorar sus prestaciones a los más de 100 °C de temperatura que se alcanzan en algunas partes del automóvil. [CON95] [MostCo], [Ciocan], [Dpar]

### ➤ Redes de Datos

Debido a su, cada vez mayor, velocidad de transmisión y junto a las ventajas que presenta con respecto a fibra óptica de vidrio (menor coste y mayor facilidad para su manejo e instalación) la POF es perfectamente adecuada para la conexión interna de hogares entre el punto de acceso (interfaz con el proveedor de servicios) y los puntos de uso (rosetas o bases de toma). Y no sólo eso, sino que también son adecuadas como medio de transmisión en lo que se conoce en redes de comunicaciones como “última milla” o red de acceso.

Por tanto, la POF es el candidato perfecto para solucionar el problema de la última milla de la FTTH (Fiber to the Home). La FTTH es una tecnología que consiste en hacer llegar la fibra hasta los hogares, en lugar de dejar la terminación de los enlaces de fibra en las proximidades del edificio FTTB (Fiber To The Building) y terminar el lazo de abonado con el tradicional par de cobre o coaxial, que normalmente genera cuellos de botella, limitando el ancho de banda que se puede ofrecer al usuario final.



**Figura 2.8 Red Óptica Pasiva (PON).**

En la figura 2.8, se muestra una típica Red Óptica Pasiva, del inglés PON (Passive Optical Network). La arquitectura general de una red PON, consiste en una OLT (Optical Line Terminator) en el lado del proveedor del servicio y en una ONU (Optical Network Unit), también conocida como ONT (Optical Network Terminal), en el lado del usuario. En la figura 2.9, se puede apreciar en detalle la arquitectura típica entre la OLT y la ONU.

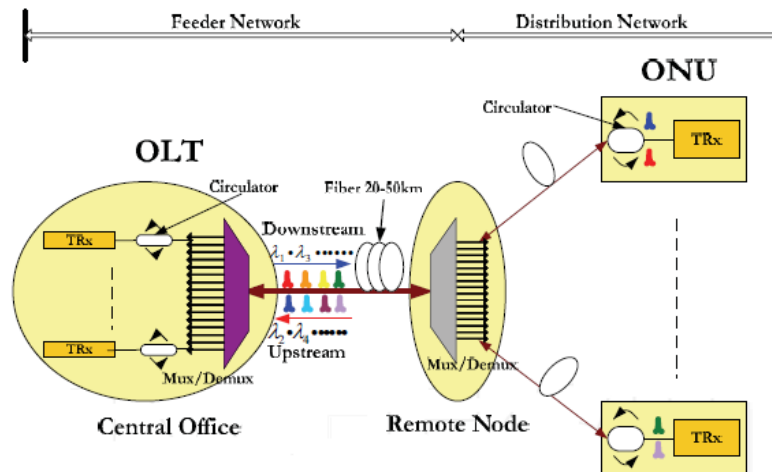


Figura 2.9 Arquitectura detallada entre la OLT y la ONU.

Las redes PON minimizan el número de transceptores, nodos centrales y despliegues de fibra en comparación con otras soluciones de fibra. Usando componentes pasivos, tales como acopladores y splitters ópticos, y eliminando regeneradores y equipamiento activo normalmente usado en redes de fibra (p. ej. amplificadores), las redes PON reducen el coste de instalación y mantenimiento de la fibra óptica. Todo eso, unido a la utilización de la POF, representa una solución muy atractiva para el problema de la última milla, tal y como se indicaba anteriormente. [JianYu], [Nes09]

En muchos países ya se está implantando esta tecnología, que está sustituyendo a los antiguos accesos xDSL, puesto que ofrece velocidades y anchos de banda suficientes para disfrutar de servicios como la TV de alta definición, video bajo demanda, voz, Internet, juegos en red, videoconferencia, teleasistencia y muchos otros servicios.

### 2.1.3 Polarizadores

Un polarizador es cualquier dispositivo óptico que obtiene a su salida algún tipo de luz polarizada cuando a su entrada tenía un haz de luz natural (sin polarizar). La posición del polarizador determina la polarización de la luz que lo atraviesa. Dicho comportamiento se puede observar en la figura 2.10. [Fpol]

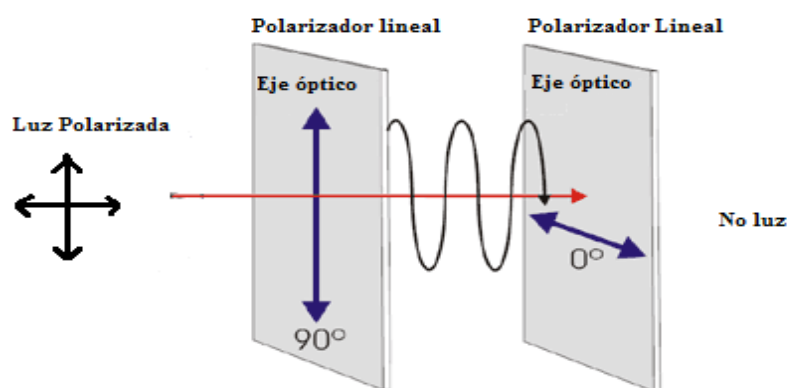




**Figura 2.10 Funcionamiento básico de un polarizador lineal.**

Según la ley de Malus, si un haz de luz no polarizada incide sobre un polarizador lineal, sólo la componente del haz que sea paralela al eje óptico de transmisión atravesará el polarizador. Se llama eje óptico del polarizador a la dirección en la que presenta menor absorción. [Op02]

Si por el contrario, la luz que llega al polarizador está polarizada (caso del láser) la intensidad luminosa del haz de luz polarizado se puede reducir e incluso bloquear completamente. Esto dependerá del ángulo de incidencia del haz con respecto al eje óptico del polarizador. Ver figura 2.11. [ApOp]



**Figura 2.11 Haz de luz bloqueado.**

Hay distintos tipos de polarizadores, entre los que se encuentran los polarizadores lineales, los circulares y los elípticos. Los más comunes son los lineales (tipo utilizado en el presente proyecto), quedando fuera del objetivo de este proyecto el resto. Dentro de los lineales tenemos dos tipos principales, los que absorben la componente de la luz que no se deja pasar, y los divisores polarizadores de haz que dividen el haz de luz incidente en dos haces con polarización ortogonal. Este último tipo, se analiza en el siguiente apartado de este capítulo. [LuV]

Las aplicaciones y usos de los polarizadores son múltiples. Suponen una excelente solución, por ejemplo, en filtros para cámaras, gafas de sol, cristales en cabinas de avión, gafas 3D, televisores, etc.

### 2.1.4 Divisores Polarizadores de Haz (Polarizing Beam Splitters)

Un divisor polarizador de haz (del inglés, Polarizing Beam Splitter (PBS)) es cualquier dispositivo óptico que divide un rayo de luz incidente en dos componentes ortogonalmente polarizadas, p y s. Un tipo de diseño, de este tipo de elemento óptico, consta básicamente de una lámina de vidrio con un recubrimiento de aluminio. Si se hace incidir un haz de luz con un ángulo de  $45^\circ$ , la mitad será reflejada y la otra mitad será transmitida. Los PBS, son ampliamente utilizados en redes de conmutación óptica, en sistemas de proyección y en dispositivos de cristal líquido (LCD's). [DMpbs]

Su aspecto más habitual es en forma de cubo, conformado por dos prismas de vidrio de forma triangular y que se encuentran unidos por la base. El espesor de la capa de resina es diseñado para que, si se hace incidir un haz de luz en una cara del cubo, la mitad de dicho haz se refleje a  $90^\circ$  (componente s) y la otra mitad se transmita (componente p). Los materiales birrefringentes que se

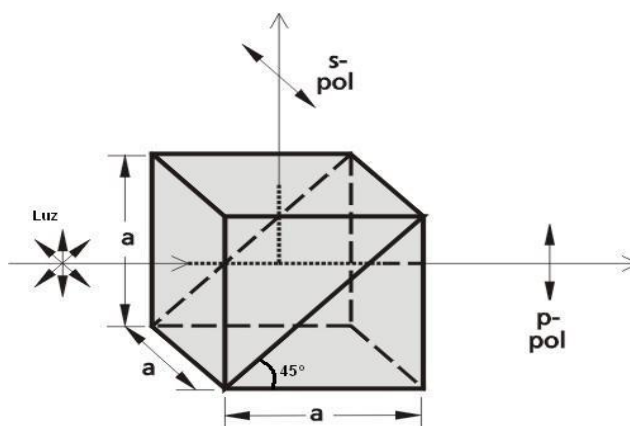


**Figura 2.12 Imagen Cubo PBS.**

emplean en los PBS, se diseñan para obtener el comportamiento deseado a una longitud de onda de trabajo concreta o para un rango de ellas. [Hard]

En la figura 2.12, se tiene una imagen de un PBS en forma de cubo, el tipo más común. [ShO]

Como se veía anteriormente, la cara por donde se unen los dos prismas posee la característica de dejar pasar la polarización p y de reflejar la polarización s cuando el haz de luz incide con un ángulo de  $45^\circ$ , como se observa en la figura 2.13. [DiIn]



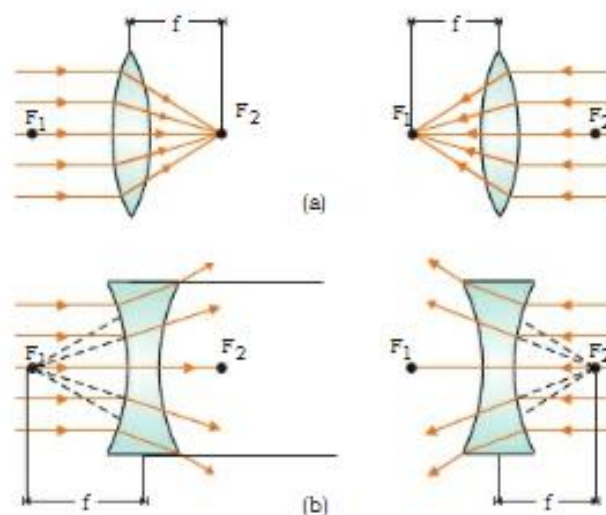
**Figura 2.13 Comportamiento de un PBS.**

Aunque la forma y el comportamiento más usual de los PBS son los comentados anteriormente, cada vez hay un mayor rango de configuraciones posibles. Así, por ejemplo, en el catálogo del fabricante EO se pueden encontrar PBS planos, en forma redonda o rectangular que ofrecen un gran rendimiento en aplicaciones que requieren una mayor apertura angular. También encontramos PBS en forma de cubo con gran ancho de banda que proporcionan una transmisión mayor del 90% para la componente p, y una eficiencia de reflexión superior al 99% para la componente s dentro del rango de longitudes de onda para el que están diseñados. Por último, otro tipo que cabe destacar son los PBS de desplazamiento lateral, que tienen forma de romboide y que en lugar de dividir el rayo incidente en dos componentes ortogonales, lo que hace es dividirlo en dos componentes paralelas separadas por una distancia fija. [EdO]

## 2.1.5 Lentes

Las lentes son elementos transparentes, normalmente de vidrio, que concentran o dispersan haces de luz paralelos. Existen dos tipos de lentes: lente cóncava que dispersa la luz y lente convexa que la concentra. Ver figura 2.14. [Tfo]

Los parámetros que básicamente definen las propiedades ópticas de las lentes son, por una parte, la distancia focal de la lente ( $f$ ) y, por otra, la relación entre la distancia focal y el diámetro de la lente. La distancia focal de una lente es la distancia del centro de la lente al foco ( $F$ ), que es donde convergen los rayos. Y por otro lado, la relación entre la distancia focal y el diámetro de una lente delimita su capacidad para captar luz. Esta relación se puede encontrar habitualmente denominada como número  $f$ , y su inversa como abertura relativa. [LenUA]



**Figura 2.14 Tipos de lentes, (a) convexa y (b) cóncava.**

El funcionamiento básico de una lente es debido a la diferencia de índice de refracción existente entre el aire y el material del que esté compuesta la lente. Por este motivo, se produce la variación de la dirección del haz de salida respecto al de entrada. Según la forma de la lente, un rayo que incide de forma perpendicular al eje de la lente puede ser dirigido hacia el interior o hacia el exterior, concentrando o dispersando el haz de luz paralelo entre sí y perpendicular al eje de la lente.

## 2.1.6 Cristales Líquidos

El cristal líquido es un tipo especial de estado de la materia que reúne ciertas características de los líquidos (movilidad y fluidez) y de los sólidos. Habitualmente, las moléculas que conforman un cristal líquido tienen forma tubular o forma de disco. Dependiendo del tipo de cristal líquido, el movimiento de sus moléculas puede ser diferente, es decir, algunas podrán rotar, deslizarse, girar, trasladarse y tener más o menos libertad de movimientos.

La orientación de dichas moléculas se puede variar aplicando un campo eléctrico al cristal líquido. Dicha orientación, les permite variar la forma en que la luz los atraviesa o los refleja, de tal manera que les permiten modificar el comportamiento de la luz en tres aspectos: su velocidad de propagación, la proporción en que es absorbida o reflejada y el sentido en que vibra.

Un cristal líquido también puede polarizarse, o lo que es lo mismo, bloquear alguno de los ejes, longitudinal, vertical u horizontal, en que vibran sus ondas, propiedad que también está se puede encontrar en otros dispositivos ópticos.

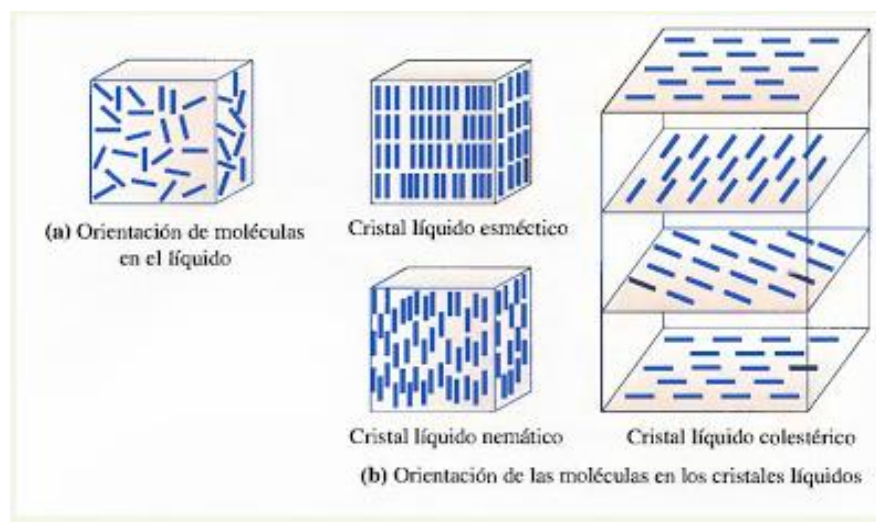
Dependiendo de su ordenación y de las estructuras moleculares que pueden formar, los cristales líquidos pueden pasar por una o más fases intermedias o mesofases, pudiéndose así clasificar en tres grupos: nemáticos, esmécticos y colestéricos.

La **fase nemática**, que es la fase más desordenada de los cristales líquidos, se caracteriza por tener ordenadas sus moléculas en cuanto a su orientación se refiere y a la vez tenerlas desordenadas en cuanto a la posición de sus centros de masa. Las moléculas poseen un eje común, alrededor del cual pueden girar o deslizarse paralelamente, además de poderse mover lateralmente.

La **fase esméctica** es la fase más ordenada, al contrario de la fase nemática. Las moléculas se organizan en varios planos paralelos entre sí, con sus ejes moleculares situados perpendicularmente a dichos planos y al mismo tiempo situados paralelamente entre sí. A la hora de moverse, las moléculas de la fase esméctica pueden hacerlo alrededor del eje de orientación común pero no pueden salirse fuera del plano en que se

encuentran situados, al igual que ocurría en la fase anterior. En cuanto a la posición de sus centros de masa, dentro de cada capa las moléculas se pueden colocar por líneas con distintos niveles de ordenamiento de los mismos.

La **fase colestérica**, tiene una estructura molecular que recuerda a la del colesterol y de ahí proviene su nombre. Las moléculas de este tipo de cristales líquidos se pueden organizar en capas paralelas entre sí, pero en este caso los ejes de las moléculas se sitúan paralelamente al plano, al contrario de lo que ocurría en la fase anterior. Pero además, la dirección de su eje va variando entre las distintas capas, de tal manera que va trazando una línea en forma helicoidal. [UniAl], [Bidg]



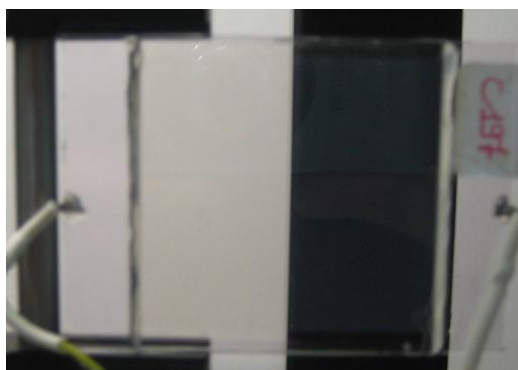
**Figura 2.15 Fases de un cristal líquido.**

En la figura anterior, figura 2.15, se puede observar las distintas fases de un cristal líquido. [Elc]

En cuanto a las aplicaciones de los cristales líquidos, hay un gran número y diversidad de ellas. Por un lado, las más conocidas como pantallas de televisión, monitores de ordenador, cabezales de impresoras, pantallas de calculadora, relojes o juegos electrónicos. Y por otro lado, algunas menos conocidas, como el reconocimiento de formas por visión artificial en robots, termómetros o detectores de tumores o fisuras, como válvulas de luz (aceptan una imagen de baja intensidad luminosa y la convierten en otra de salida más intensa).

Otras utilidades que se encuentran en fase de experimentación o investigación, pueden ser, por ejemplo, gafas de uso común fabricadas con cristal líquido, que daría lugar a que fuesen mucho más adaptables al ojo humano o a la creación de zooms más potentes y menos pesados, o para almacenamiento holográfico de datos, que aumentaría enormemente las limitadas capacidades con las que trabaja la informática. [Unizar], [UniAl]

En la figura 2.16, se puede apreciar una foto real de una célula de cristal líquido similar a las utilizadas en el laboratorio [PeCL]



**Figura 2.16 Foto real de una célula de cristal líquido.**

### **2.1.7 Conmutadores ópticos basados en LC**

En este apartado se pretende dar una visión general del estado actual de las comunicaciones ópticas y más en concreto, de los conmutadores ópticos basados en cristal líquido. En ese sentido, se presentan los diferentes tipos que existen, y la evolución en el tiempo de los mismos para destacar la importancia que tiene esta tecnología en el panorama actual de las telecomunicaciones. [Chua10]

El rápido crecimiento del tráfico en las redes troncales ha acelerado la investigación en tecnologías y redes de comunicaciones ópticas, debido al gran ancho de banda que ofrece la fibra óptica. Debido a esta tendencia, se hace necesaria la aparición de dispositivos de conmutación capaces de soportar este tipo de tecnologías emergentes. Por ello, en los últimos años han ido apareciendo diferentes tipos de

conmutadores ópticos basados en cristal líquido como una de las promesas para mejorar la conmutación óptica en las redes de telecomunicaciones. La ventaja de este tipo de dispositivos es que lo único que necesita para realizar la conmutación es un control del voltaje aplicado.

Se pueden distinguir diferentes tipos de conmutadores ópticos, como los basados en cristal líquido nemático torsionado (TN), en cristal líquido ferroeléctrico con superficie estabilizada (SSFLC) o en cristal líquido de polímero disperso (PDLC).

Las células SSFLC son las más utilizadas en dispositivos basados en FLC. En estos dispositivos el FLC se dispone entre dos sustratos separados por una capa muy fina de LC. Aunque se han aplicado multitud de orientaciones moleculares en los SSFLC, la más empleada es la estructura biestable en capas ordenadas. Esta estructura tiene un tiempo de respuesta de tan solo unos microsegundos además de un efecto memoria. Así, cuando se aplica un campo eléctrico, la orientación de las moléculas cambia y el dispositivo se mantiene en ese estado hasta que se le aplica un voltaje que lo revierta. Este tipo de dispositivos, en la práctica, presentan un voltaje de conmutación de unos pocos voltios, un consumo de potencia muy bajo y un tiempo de respuesta de unos microsegundos en función de los parámetros de fabricación. Lo que ocurre con este tipo de dispositivos, es que están optimizados para una longitud de onda dada, presentando cambios abruptos para otras longitudes de onda.

El cristal líquido de polímero disperso (PDLC) consiste en una base con multitud de pequeñas moléculas de cristal líquido dispersas por toda la base. Dentro de cada gota, el material nemático está uniformemente alineado, pero no ocurre así entre distintas gotas. En el estado de OFF, sin voltaje aplicado, el sistema dispersa la luz mientras que en el estado ON, con voltaje aplicado, las moléculas se sitúan paralelas al campo eléctrico y la estructura se vuelve transparente dejando pasar luz.

El cristal líquido nemático (TN) con anisotropía dieléctrica positiva es ampliamente utilizado en dispositivos TN. Cuando se le aplica un voltaje suficiente, llamado voltaje de conmutación, las moléculas se alinean en paralelo al campo eléctrico y la rotación de la polarización desaparece, estado ON. Este tipo de dispositivos,



presentan un voltaje de conmutación de unos pocos voltios (3-5V), un consumo de potencia muy bajo (nW) y un tiempo de respuesta de ms (20-30 ms). Las células de cristal líquido nemático tienen un tiempo de respuesta más lento que las FLC, pero pueden operar en un rango de longitudes de onda más amplio.

Este último tipo de células, se emplean comúnmente en conmutadores ópticos basados en el control de la polarización (RotPol). Este tipo de conmutadores se basan en el cambio del estado de la polarización de la luz incidente cuando se le aplica un voltaje a la célula de cristal líquido. Para minimizar las pérdidas y la dependencia de la polarización se emplea un método que trata cada polarización en paralelo. La luz incidente se descompone en las componentes, S y P y tras pasar a través del dispositivo se recombinan a la salida del mismo.

En la figura 2.17, se muestra el estado del arte de los conmutadores RotPol basados en cristal líquido. [Chua10]

Contribution	LC cell	$\lambda$ (nm)	Type	Fiber	CT (dB)	IL (dB)	Turn-on/D. time	Control voltage	Elements
(Wagner and Cheng, 1980)	TN-LC	633	1 × 2	MM	-20	0.4 <sup>1</sup>	—	2.5V	2PBS, 2AP, 1LLC
(Soref, 1981)	TN-LC	632.8	2 × 2	MM	-27	2.5	50/150ms	5V	4PBS, 2 LLC, 7 AP
(Soref and McMahon, 1982)	TN-LC	633	2 × 2	None	-32	3	—	6V	2 LC, 2 HWP, 3 Calcites
(McAdams et al., 1990)	NLC-FLC	—	2 × 2	—	-20	1.4	250 $\mu$ s	15Vrms	2 NLC 2 SS-FLC, 2 M, 4 HIEP
(McAdams and Goodman, 1990)	FLC	633	1 × 4	—	-21.6	3.5	50 $\mu$ s	—	4 FLC, 4 PBS
(Grimes et al., 1991)	FLC	820(670)	6 × 6	MM	—	11.1	150 $\mu$ s	—	6FLC, 6 GL
(Fujii, 1993)	TN-LC	1300	2 × 2	SM	-43.3	2.2	—	—	2 PBS, 2 AP, 5 LC, 2 BR
(Riza and Yuan, 1998)	FLC	1300	2 × 2	SM	-34.1	6.94	35.3 $\mu$ s	—	4PBS, 2M, 4LC, 2AP, 2HWP, 2QWP, 1LB
(Riza and Yuan, 1999)	FLC	1550	2 × 2	SM	-40	6.76	35.3 $\mu$ s	—	1PBS, 2LC, 2P, 1M, 1HWP, 1QWP, 1AP
(Vázquez et al., 2003)	NLC	650-850	1 × 2	MM	-22	7	ms	8V	1PBS, 1LC, 1P
(Riza and Madamopoulos, 2005)	TN-LC	—	—	—	-20	2	—	—	2FO-Circulator, 2 PBS, 2 LC, 2 TIR, 2 BDP
(Lallana et al., 2006)	NLC	650-850	3 × 1	MM	-23	3	20-5 ms	3V	2 PBS, 4 L, 6LC, 1 P
(Lallana et al., 2007)	NLC	650-850	Dual 3 × 2	MM	-20	—	13,5ms	5V	3 PBS, 8 L, 6LC
(Yang et al., 2008)	NLC/FLC	808	2 × 2	—	-36.2	2.5	60.6 $\mu$ s 35 $\mu$ s	$\pm 15$ transient $\pm 5$ V hold	4 PBS, 2 HWP, 4 QWP, 4 M
[Lallana-2011]	TN-LC	532-850	2x(3x1)	POF	-15	~15	~10- ~100ms	5Vrms	3 PBS, 6 LC, 2+6 L

AP: Right-Angle Prism	M: Mirror
BDP: Beam Displacing Prism	MM: MultiMode
BR: Birefringent Crystal	NLC: Nematic Liquid Crystal
FLC: Ferroelectric Liquid Crystal	P: Polariser
GL: GRIN Lens	PBS: Polarizing Beam Splitter
HWP: Half Wave Plate	QWP: Quarter Wave Plate
HIEP: High Index Equilateral Prism	SM: SingleMode
LB: Leakage Block	TIR: Total Internal Reflection Prism
LLC: Large LC Cells	TN-LC: Twist Nematic Liquid Crystal

**Figura 2.17 Estado del arte de conmutadores RotPol basados en LC.**

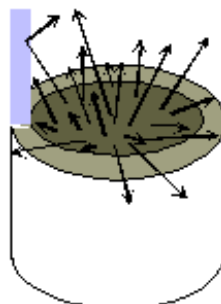
En estos conmutadores, además de células de LC, se pueden emplear PBS, espejos, lentes, prismas y otro tipo de elementos. La mayoría de ellos emplea lentes para acoplar la luz en fibras ópticas.

## 2.1.8 Fuentes Ópticas

También conocidos como Fotoemisores, son fuentes que convierten energía eléctrica en energía óptica. La luz emitida por la fuente puede ser acoplada a una fibra óptica para su transmisión. Hay dos categorías principales de las fuentes de señales ópticas:

### Diodos Emisores de Luz (LED) (Light Emitting Diodes)

Los diodos emisores de luz se definen como dispositivos semiconductores que emiten luz no coherente (diferente fase) mediante emisión espontánea, cuando se les excita con una adecuada corriente eléctrica.



**Figura 2.18 Emisión de luz en un LED.**

En la anterior imagen, figura 2.18, se representa la emisión no coherente de un diodo LED. [Uclm]

Los LED tienen un coste más bajo que los LASER, pero son dispositivos menos utilizados en aplicaciones ópticas. Se suelen emplear en aplicaciones en las que no sean necesarias altas tasas de transmisión, las distancias no sean muy grandes y se precise de un coste bajo. Entre los LED más usados para comunicaciones con fibra óptica encontramos el LED de superficie emisora (SLED) y el LED de borde emisor (ELED).

Los SLED están formados por una estructura menos compleja, tienen un menor coste y pero sólo pueden trabajar con un rango de potencias y velocidades tendiendo a bajas. Aunque la potencia que pueden generar es mayor que la de los ELED al tener una superficie emisora tan grande que se traduce en una peor eficiencia de acople con la fibra óptica.

Por otra parte, los ELED son más caros y con una estructura más compleja que los anteriores. Permiten emitir a gran potencia y a gran velocidad permitiendo una gran eficiencia de acople con la fibra. [ToW03], [Lpub], [MoL]

En la siguiente figura, figura 2.19, se puede observar los dos tipos de fuentes LED que se utilizaron en la parte experimental del presente proyecto:

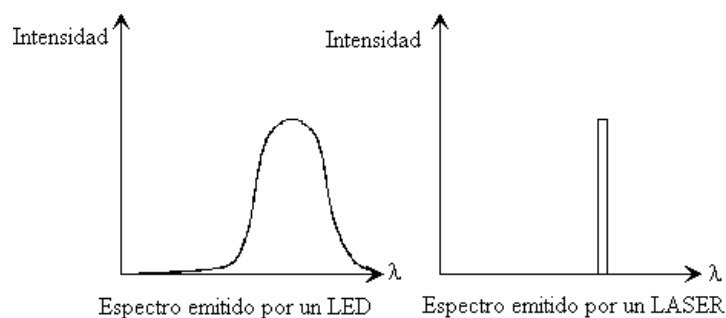


**Figura 2.19 Led Advanced Fiber Solutions (izqda) y Led Ratioplast Optoelectronics (dcha).**

Por un lado, el Diodo Led Advanced Fiber Solutions se utilizó para medidas con longitudes de onda de 850 nm y 1300 nm. Y por otro lado, para medidas con longitudes de onda de 660 nm y 850 nm se utilizó el diodo LED Ratioplast Optoelectronics. Para información más detallada y especificaciones sobre dichas fuentes se puede consultar el datasheet anexo.

### Diodos Laser (Laser Diodes)

Los diodos láser son dispositivos semiconductores que emiten luz coherente muy direccional y prácticamente monocromática cuando se les aplica una corriente. Esto significa que la anchura del espectro emitido por un láser es menor que el de un Led. En la siguiente figura, figura 2.20, se presenta una comparativa de los espectros emitidos por un LED y un LASER. [Uclm]



**Figura 2.20 Espectro emitido por un LED y un LASER.**

Los láseres trabajan a velocidades mucho más altas, disipan mayor cantidad de energía y su coste es mayor que el de los diodos LED.

En cuanto a los tipos de LASER que hay, tenemos los de emisión lateral (Fabry-Perot y el de retroalimentación distribuida) y los de emisión superficial con cavidad vertical (VCSEL).

Los de Fabry-Perot son más económicos pero no soportan altas velocidades. Los de Retroalimentación Distribuida (DFB) tienen un mayor coste pero funcionan a velocidades mayores y tienen una anchura espectral más estrecha. En cuanto al VCSEL cabe decir que se desmarca en cuanto a cualidades respecto a los dos tipos anteriores.

Tiene un alto rendimiento además de un coste bajo. Son de reducido tamaño, tienen un ancho espectral muy estrecho, una corriente de umbral muy baja (del orden de mA) y puede alcanzar grandes potencias y velocidades. [ToW03]

## 2.1.9 Fotodetectores

Un fotodetector es un dispositivo capaz de transformar la energía lumínica en energía eléctrica, es decir, la función opuesta a un fotoemisor. Cuando una señal luminosa atraviesa el fotodetector, éste genera una corriente eléctrica proporcional además de una corriente eléctrica que se presenta como ruido. En el caso de que el fotodetector disponga de un mecanismo de ganancia, se amplifican tanto la señal como el ruido generado [Bhat94]

Los fotodetectores se pueden agrupar en dos categorías:

- **Los Fotodiodos PIN:** Los fotodiodos PIN se utilizan especialmente en aplicaciones con poca exigencia o criticidad. Se caracterizan por un tiempo rápido de respuesta y un precio moderado. Son los más habituales
- **Los Fotodiodos de Avalancha:** Los fotodiodos de avalancha son menos habituales y se suelen utilizar en enlaces de gran distancia o cuando se requieren unas grandes tasas de transmisión. Su precio es mayor. [Duch05], [Bhat94]

En la figura 2.21, se observa un fotodetector con ganancia empleado para algunas medidas del presente proyecto.



Figura 2.21 Fotodetector PDA100A-EC de ThorLabs.

### 2.1.10 Medidor de Potencia Óptica

Un medidor de potencia óptica típico consiste en un fotodetector calibrado que captura la luz que entra en la apertura. Se utiliza generalmente para determinar la potencia transmitida en un transmisor óptico, en una fuente de prueba o en una fibra óptica.

Generalmente, están adaptados para su uso tanto con fibras monomodo como multimodo y son compatibles con todos los conectores de fibra óptica estándar del mercado. Algunos, además de medir potencia óptica, permiten medir atenuación y pérdidas de inserción. [Lacy93]

También es variable el rango de longitudes de onda para las que funciona, dependiendo del modelo de medidor que se utilice. En concreto, el modelo utilizado para el presente proyecto fue de la marca comercial Rifocs 557B, el cual es adecuado para longitudes de onda no superiores a 650 nm.

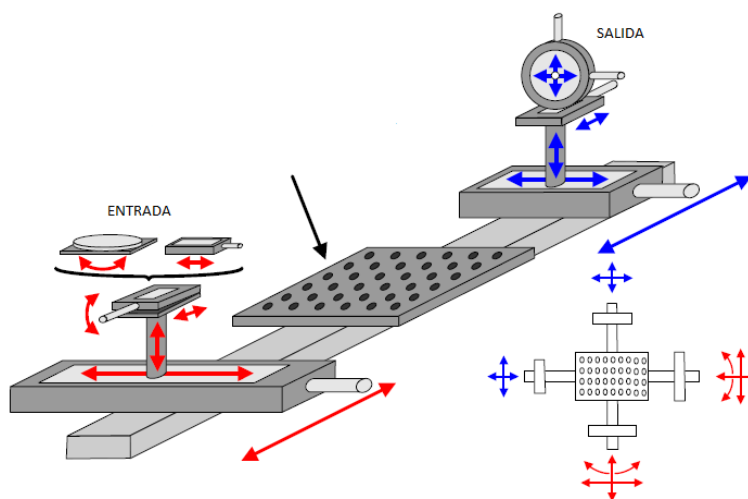
En la siguiente figura, figura 2.22, se puede observar un medidor de potencia óptica del fabricante Rifocs similar al utilizado para algunas de las medidas de este proyecto.



**Figura 2.22 Medidor de Potencia Óptica Rifocs modelo 555B.**

## 2.2 Descripción del Banco de Caracterización Óptica

Dado que en el presente proyecto se realizan diferentes caracterizaciones, con distintos elementos y con distintas posiciones de los mismos, fue necesario el diseño y montaje de un Banco de Caracterización Óptica que permitiese realizar y tomar las distintas medidas de los diferentes dispositivos y elementos de manera sencilla y dinámica, pudiendo añadir o quitar elementos del banco sin apenas dificultad dependiendo del tipo de caracterización del que se tratase. En la figura inferior, figura 2.23, se puede observar la estructura del banco de medición. [PeCL]



**Figura 2.23 Esquema del banco de caracterización óptica.**

Como se puede observar, el banco permitía gran libertad de movimientos y posiciones tanto a los distintos elementos del montaje como a las propias entradas y salidas de potencia. En concreto, podemos observar la presencia de mecanismos que permitían movimientos rotatorios, movimientos lineales y en distintos ejes.

Al banco anteriormente descrito hay que añadirle, en cada caso, los diferentes elementos y equipos electrónicos de medida a la entrada y a la salida y los elementos centrales necesarios dependiendo de si se trata de la caracterización de polarizadores, PBS, o cristales líquidos.

## 3. Caracterización de Polarizadores

En este apartado, se procede a especificar una parte del experimento llevado a cabo para la materialización del presente proyecto. En este caso, se trata de analizar el comportamiento de distintos modelos de polarizadores a longitudes de onda de 550 nm, 650 nm, 830 nm, y 1300 nm. Asimismo, se describe el montaje experimental de caracterización realizado en el banco de trabajo. También se definen y determinan los diferentes elementos utilizados. Por último, se analizan los resultados obtenidos.

De esta forma, en el apartado 3.1 se identifican los elementos, polarizadores, fuentes ópticas y medidores de potencia, que se han empleado para llevar a cabo las mediciones. En el apartado 3.2 se presenta el esquema del montaje realizado. En el apartado 3.3 se presenta el procedimiento seguido en la toma de valores y en los subapartados 3.3.1, 3.3.2 y los sucesivos se analizan de manera detallada e individual los resultados obtenidos para cada longitud de onda estudiada, comprobando el comportamiento de cada uno de los polarizadores caracterizados. Finalmente, en el subapartado 3.3.5 se realiza una comparativa de las características de cada polarizador en base a los resultados

### 3.1 Componentes Empleados

#### Polarizadores

Como se ha comentado anteriormente, el presente proyecto se basa en la caracterización de elementos ópticos para conocer su comportamiento. Los diferentes tipos de polarizadores empleados se detallan a continuación:

- ❖ Polarizador de Plástico Marrón
- ❖ Polarizador Film en Cristal
- ❖ Polarizador Film en Cristal con Alto Contraste
- ❖ Wide Grid Polarizer con Recubrimiento Antirreflejante (WGP con AR (PPL04C))



- ❖ WGP sin Recubrimiento Antirreflejante (WGP sin AR (PPL04A))

## **Fuentes Ópticas**

En el caso de las fuentes ópticas, también se utilizaron varios tipos diferentes. Gracias a esto se puede comparar el comportamiento y los resultados a distintas longitudes de onda y con distintos modelos de fuente. Los tipos de fuente que se utilizaron son:

- ❖ Láser Rojo (650 nm), sin conectorizado en fibra
- ❖ Láser Verde (550 nm), sin conectorizado en fibra
- ❖ Diodo Led RatioPlast Optoelectronics (850 nm) conectorizado en fibra
- ❖ Diodo Led Advanced Fiber Solutions (850 nm) conectorizado en fibra
- ❖ Diodo Led Advanced Fiber Solutions (1300 nm) conectorizado en fibra

## **Medidores de Potencia Óptica**

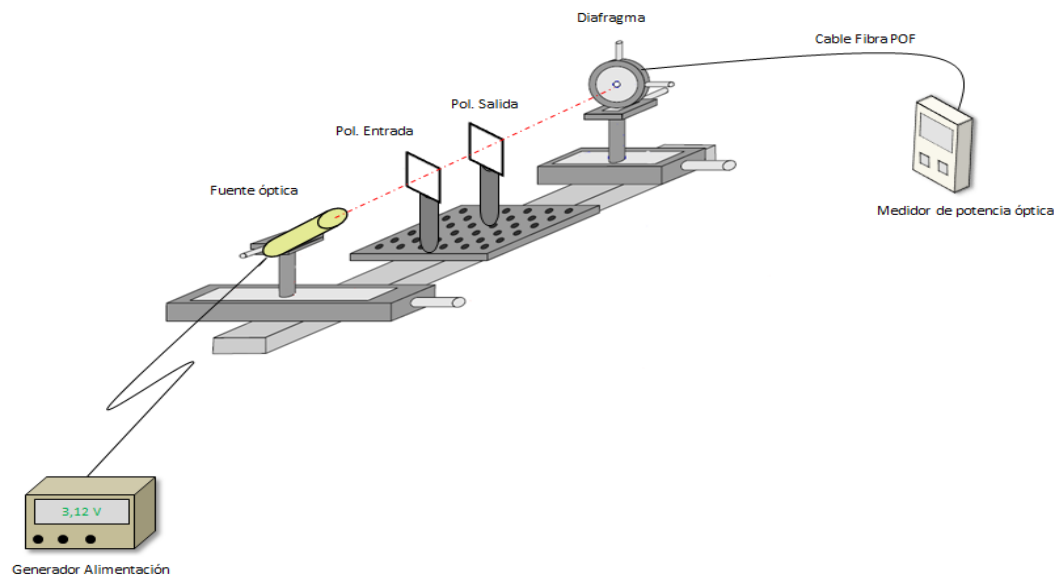
En cuanto a los medidores de potencia para la salida, también se utilizaron 3 tipos diferentes:

- ❖ Medidor de potencia óptica (Rifocs 557B)
- ❖ Fotodetector de ganancia (PDA100A-EC)
- ❖ Fotodetector de ganancia (PDA10CS-EC)

Los dos primeros se utilizaron para obtener dos conjuntos independientes de medidas para longitudes de onda de 650 nm y 550 nm. Además, el PDA100A-EC también se utilizó para las medidas realizadas a 850 nm. En cambio, el modelo PDA10CS-EC sólo se utilizó en el caso de las medidas realizadas a 1300 nm puesto que el PDA100A-EC no era adecuado para longitudes de onda tan altas. Cabe indicar, que los modelos PDA100A-EC y PDA10CS-EC son ajustables en ganancia, poseyendo 8 pasos de ganancia en saltos de 10 dB, es decir, de 0 a 70 dB.

## 3.2 Montaje experimental

En la figura 3.1 se muestra el montaje realizado para la caracterización de cada uno de los distintos polarizadores, variando en cada caso los tipos de polarizadores y elementos a la entrada y la salida del mismo, tal y como se explica en los siguientes apartados.



**Figura 3.1 Esquema del sistema completo para caracterización de polarizadores.**

En la próxima imagen, figura 3.2, se puede contemplar una foto real del montaje realizado para un caso concreto de estudio.



**Figura 3.2 Foto real del sistema completo para caracterización de polarizadores.**

### 3.3 Resultados de Caracterización de los Polarizadores

El procedimiento común de caracterización para todos polarizadores utilizados en el presente proyecto fue el que se describe a continuación:

- En primer lugar, se realizó la medida de la potencia óptica de salida de la fuente óptica en vacío, es decir, tan solo poniendo la fuente óptica y el medidor de potencia.
- En segundo lugar, se realizó la medida de la potencia óptica de salida interponiendo un polarizador, llamémoslo polarizador de entrada, entre la fuente óptica y el medidor de potencia de salida. En este paso, se fue ajustando la posición del polarizador de entrada de manera paulatina para obtener la máxima potencia posible a la salida.
- El siguiente y último paso, fue añadir a la configuración del paso anterior un segundo polarizador, llamémoslo polarizador de salida, del mismo tipo que el polarizador de entrada. Este segundo polarizador se situó entre el polarizador de entrada y el medidor de potencia óptica. Dejando en la posición de potencia máxima el polarizador de entrada y rotando el polarizador de salida paulatinamente, se consiguió obtener la potencia a la salida del sistema tanto máxima como mínima dependiendo de la posición en la que se encontrase el polarizador de salida.

El mismo procedimiento se repite para todas las fuentes ópticas empleadas, los diferentes polarizadores y los distintos medidores de potencia.

El parámetro que se va a emplear para la caracterización de los polarizadores es básicamente el siguiente:

- ✓ **Pérdidas de Inserción**, en inglés Insertion Loss (IL), se puede definir como la reducción que se produce en la potencia de entrada cuando la luz se transmite a

una salida. Se calcula como la relación entre potencia de entrada y potencia de salida y se mide en dB.

$$IL = -10 \cdot \log(P_{out}/P_{in}) \quad [3.1]$$

donde  $P_{out}$  es la potencia de salida y  $P_{in}$  es la potencia de entrada, ambas en unidades naturales. Dicha expresión arroja un valor mayor que cero.

Si en cambio las potencias se encuentran en unidades logarítmicas, la expresión sería la siguiente:

$$IL = P_{out} - P_{in} \quad [3.2]$$

A continuación, en los siguientes subapartados, se explican las características particulares de cada caso de medida y se detallan en forma de tabla o gráfica los diferentes valores de potencia obtenidos.

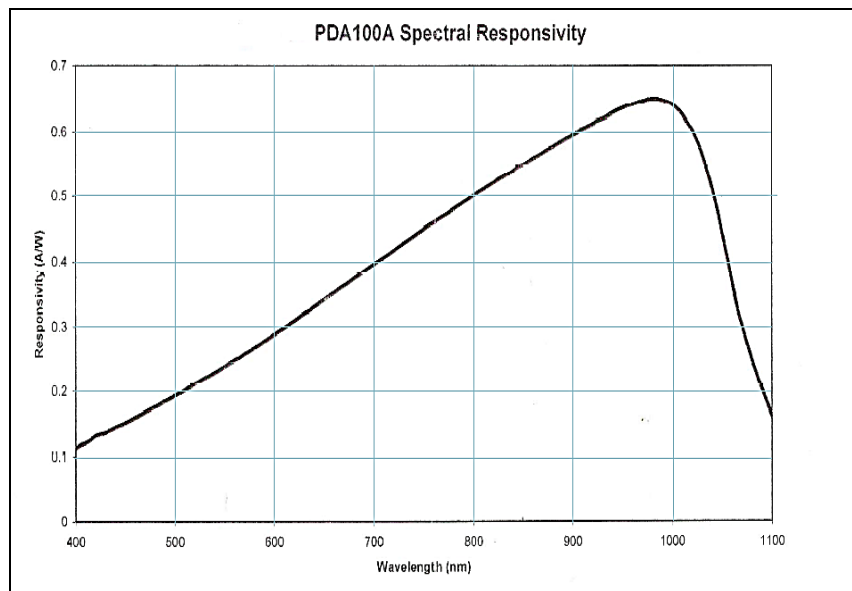
### 3.3.1 Medidas con Fuente Láser Rojo

Para las medidas realizadas con el láser rojo, a longitud de onda de 650 nm, se alimentó dicha fuente mediante un generador con una tensión de 2,6 voltios. Se utilizó, en este caso, para medir la potencia dos tipos de detectores. Por un lado, el fotodetector PDA100A-EC y, por otro, el medidor de potencia óptica Rifocs 557B.

En el caso del fotodetector PDA100A-EC, la potencia se obtiene en términos de voltaje a través de un osciloscopio, siendo necesario realizar un cálculo para obtener la potencia en dB o dBm. Dado que se configuró, para esta medición, el fotodetector con una ganancia de 20dB y obteniendo el valor de la Responsividad Espectral de la figura 3.3, la fórmula necesaria para obtener la potencia en dB es la siguiente:

$$\text{Salida [V/W]} = \text{Ganancia de transimpedancia [V/A]} * R(\lambda) \text{ [A/W]} \quad [3.3]$$

donde la ganancia de transimpedancia es de 15000 V/A para los 20dB de ganancia configurados en el fotodetector y donde la responsividad espectral,  $R(\lambda)$ , se obtiene de la figura 3.3, que se puede consultar en la hoja de características de fotodetector en cuestión.



**Figura 3.3 Responsividad espectral del PDA100A-EC.**

Una vez obtenida la potencia de salida en Vatios, se puede calcular la potencia en dB con la fórmula:

$$P[\text{dB}] = 10 \cdot \text{LOG}(P[\text{W}]) \quad [3.4]$$

Por otro lado, en cuanto al medidor de potencia Rifocs las medidas de potencia de salida se obtuvieron directamente en dBm por lo que no fue necesario ningún cálculo adicional.

En la siguiente tabla, Tabla 3.1, se resumen los valores de potencia de salida y de pérdidas de inserción para todos los polarizadores estudiados y para ambos medidores de potencia utilizados a la salida del montaje.

Polarizador	Estado	Pot. Salida Fotodetector [dBm]	Pot. Medidor RIFOCS [dBm]	Insertion Loss (IL) [dB]	Insertion Loss (IL) RIFOCS [dB]
Film Cristal	Vacío	-2,21	-2,53	0	0
	Con 1 Pol.	-3,39	-3,5	1,18	0,97
	Con 2 Pol. (mín.)	-26,72	-43,93	24,50	41,4
	Con 2 Pol. (máx.)	-4,92	-4,63	2,70	2,1
Film Cristal Alto Contraste	Vacío	-1,88	-2,45	0	0
	Con 1 Pol.	-2,62	-3,26	0,73	0,81
	Con 2 Pol. (mín.)	-26,69	-46,89	24,81	44,44
	Con 2 Pol. (máx.)	-3,60	-4,07	1,71	1,62
Plástico Marrón	Vacío	-2,16	-2,7	0	0
	Con 1 Pol.	-4,36	-4,93	2,20	2,23
	Con 2 Pol. (mín.)	-26,66	-43,87	24,50	41,17
	Con 2 Pol. (máx.)	-6,40	-6,93	4,24	4,23
WGP sin recubrimiento	Vacío	-1,96	-2,52	0	0
	Con 1 Pol.	-3,58	-3,41	1,62	0,89
	Con 2 Pol. (mín.)	-26,74	-42,36	24,77	39,84
	Con 2 Pol. (máx.)	-4,02	-4,47	2,05	1,95
WGP con recubrimiento	Vacío	-1,92	-2,46	0	0
	Con 1 Pol.	-2,39	-2,94	0,47	0,48
	Con 2 Pol. (mín.)	-26,71	-44,93	24,78	42,47
	Con 2 Pol. (máx.)	-2,93	-3,54	1,01	1,08

**Tabla 3.1 Resumen medidas obtenidas para los distintos polarizadores a 650 nm.**

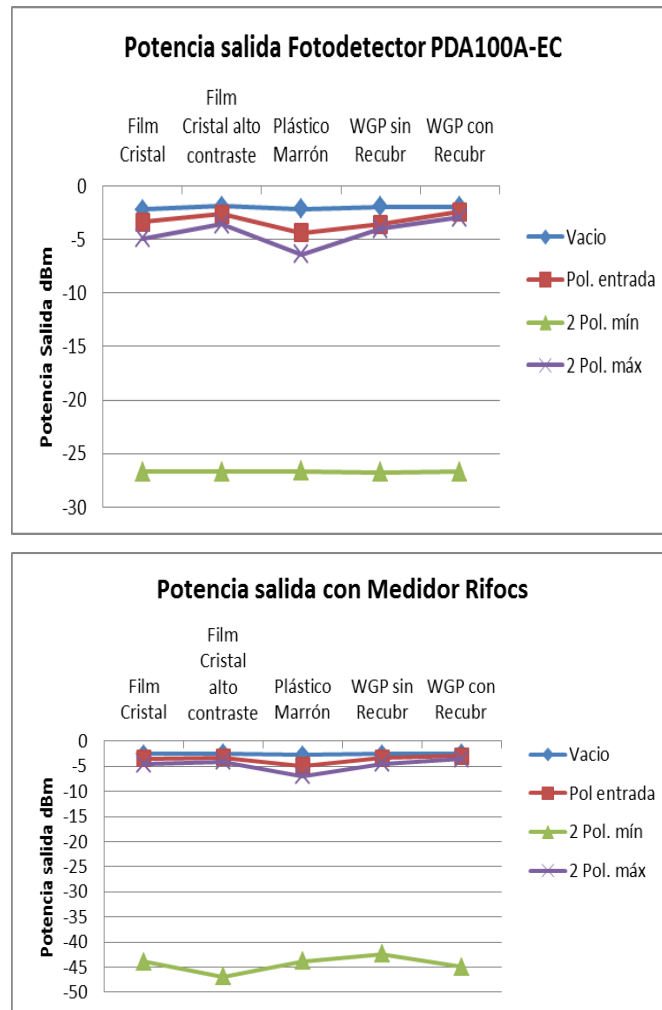
Para el cálculo de las Pérdidas de Inserción (IL), se ha empleado la ecuación 3.1, indicada en el apartado anterior. El valor de este parámetro es el que se va a utilizar para medir la calidad de cada polarizador empleado, es decir, lo bien o mal que se comporta a determinada longitud de onda.

Se puede observar que los valores obtenidos para ambos medidores de potencia son muy similares, lo que hace pensar que las mediciones se han realizado correctamente y de esta forma se podrán obtener unos resultados concordantes y rigurosos. Por tanto, se van a analizar los datos en base a uno sólo de los medidores de potencia utilizados, ya que las conclusiones y resoluciones serían extrapolables al otro tipo de medidor de potencia.

Así, por ejemplo, si nos fijamos en los valores obtenidos para el fotodetector PDA100A-EC, los mejores resultados para la longitud de onda bajo estudio, 650 nm, se obtienen para el polarizador WGP con recubrimiento seguido del polarizador Film Cristal con alto contraste con tan solo 1,01 dB y 1,71 dB, respectivamente, de pérdidas de inserción para el sistema completo, es decir, con dos polarizadores integrados en el montaje. En contraposición, se encuentra el polarizador de Plástico Marrón el cual

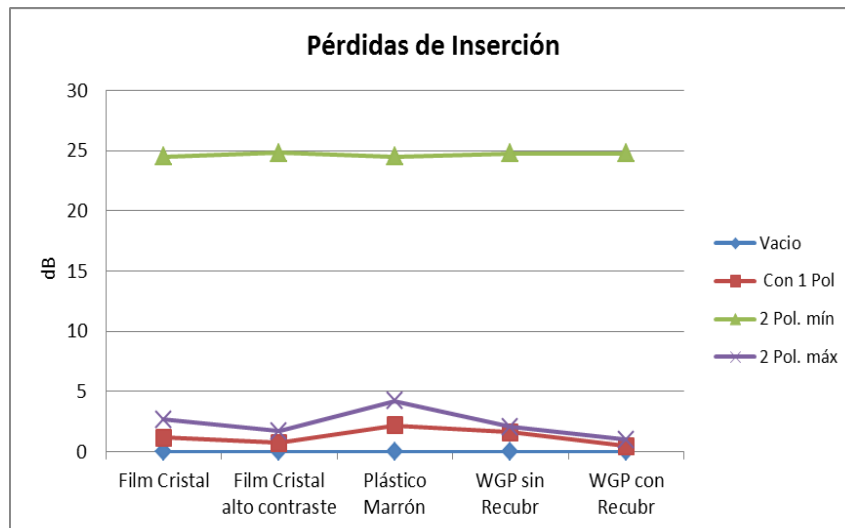
arroja los peores resultados de potencia y pérdidas de inserción a esta longitud de onda, con un valor de 4,24 dB de IL para el sistema completo.

En la siguiente gráfica, figura 3.4, se muestran de forma más visual los valores de potencia de salida obtenidos para cada uno de los polarizadores y para ambos medidores de potencia:



**Figura 3.4 Potencia de salida a 650 nm con ambos medidores de potencia.**

De igual modo, en la figura 3.5 se muestra un gráfico en el que se puede apreciar las pérdidas de inserción de los diferentes polarizadores para el fotodetector PDA100A-EC:

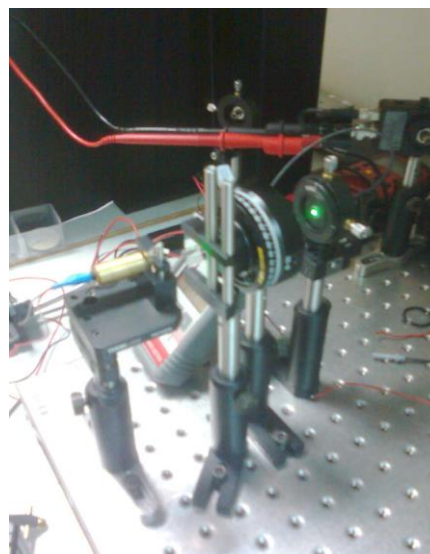


**Figura 3.5 Pérdidas de inserción a 650 nm con fotodetector PDA100A-EC.**

### 3.3.2 Medidas con Fuente Láser Verde

Para las medidas realizadas con el láser verde, con longitud de onda de 550 nm, se alimentó dicha fuente mediante un generador con una tensión de 2,5 voltios. En el caso de esta fuente, al igual que para la fuente láser rojo, se utilizó como elemento de medida de la potencia de salida dos tipos de detectores, el fotodetector PDA100A-EC y el medidor de potencia óptica Rifocs 557B.

En la figura 3.6, se puede ver una imagen real del montaje realizado para las medidas en el caso de la fuente láser verde.



**Figura 3.6 Foto real del montaje del sistema completo para 550 nm.**



La casuística es la misma que para la anterior fuente descrita, es decir, que para el fotodetector PDA100A-EC, fue necesario calcular la potencia en dBm como se describe en el apartado anterior. El fotodetector se configuró una ganancia de 20dB, así que el valor de la ganancia de transimpedancia es el mismo que para el caso anterior. En cambio, lo que sí varía es la referencia espectral, debiendo encontrar el nuevo valor para a longitud de onda en estudio, 550 nm.

En la siguiente tabla, Tabla 3.2, se recopilan los valores de potencia de salida y de pérdidas de inserción para todos los polarizadores estudiados y para ambos medidores de potencia utilizados a la salida del montaje a longitud de onda 550 nm.

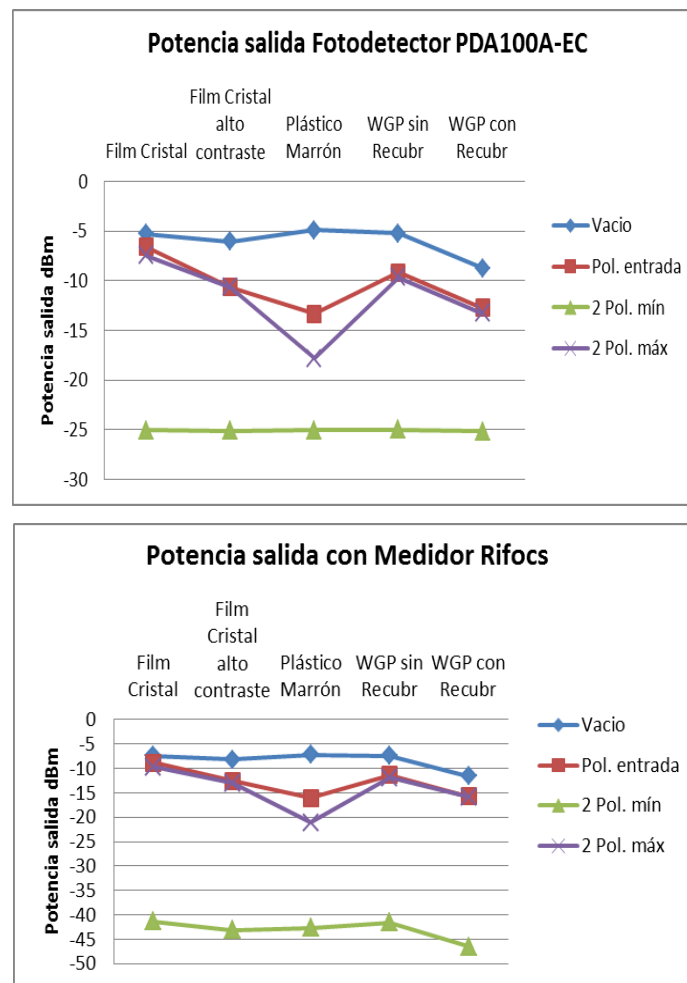
Polarizador	Estado	Pot. Salida Fotodetector [dBm]	Pot. Medidor RIFOCS [dBm]	Insertion Loss (IL) [dB]	Insertion Loss (IL) RIFOCS [dB]
Film Cristal	Vacío	-5,27	-7,46	0	0
	Con 1 Pol.	-6,60	-8,88	1,32	1,42
	Con 2 Pol. (mín.)	-25,08	-41,38	19,80	33,92
	Con 2 Pol.(máx.)	-7,50	-9,73	2,22	2,27
Film Cristal Alto Contraste	Vacío	-6,06	-8,24	0	0
	Con 1 Pol.	-10,64	-12,6	4,58	4,36
	Con 2 Pol. (mín.)	-25,11	-43,07	19,04	34,83
	Con 2 Pol.(máx.)	-10,64	-13,04	4,58	4,8
Plástico Marrón	Vacío	-4,88	-7,19	0	0
	Con 1 Pol.	-13,34	-16,04	8,45	8,85
	Con 2 Pol. (mín.)	-25,05	-42,67	20,16	35,48
	Con 2 Pol.(máx.)	-17,81	-21,13	12,92	13,94
WGP sin recubrimiento	Vacío	-5,25	-7,38	0	0
	Con 1 Pol.	-9,14	-11,41	3,89	4,03
	Con 2 Pol. (mín.)	-24,98	-41,59	19,7	34,21
	Con 2 Pol.(máx.)	-9,64	-11,92	4,39	4,54
WGP con recubrimiento	Vacío	-8,75	-11,58	0	0
	Con 1 Pol.	-12,71	-15,79	3,96	4,21
	Con 2 Pol. (mín.)	-25,13	-46,55	16,38	34,97
	Con 2 Pol.(máx.)	-13,28	-15,86	4,53	4,28

**Tabla 3.2 Resumen medidas obtenidas para los distintos polarizadores a 550 nm.**

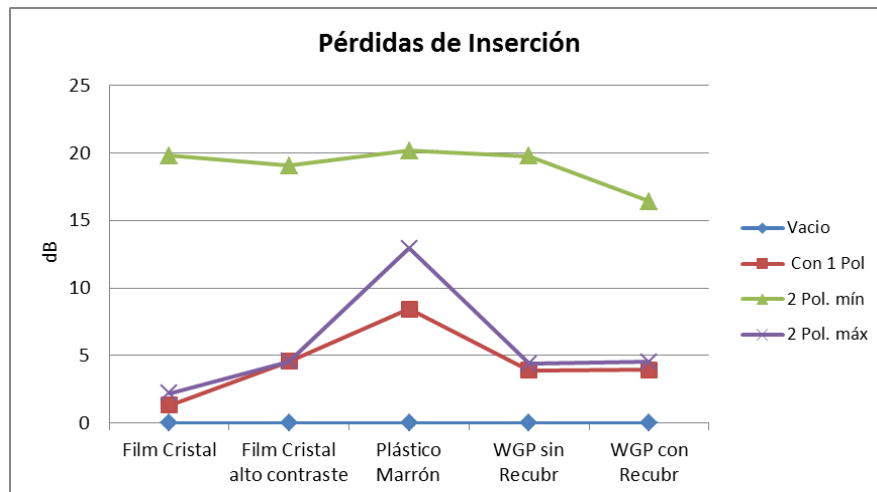
Como se puede observar, en este caso el polarizador que obtiene mejores resultados de pérdidas de inserción es el Polarizador Film Cristal, con 2,22 dB, seguido del polarizador WGP sin recubrimiento, con un valor de 4,39 dB. Por otro lado, al igual que ocurría para la anterior longitud de onda, el peor parado es el polarizador de Plástico Marrón con unas pérdidas de inserción de 12,92 dB, valor muy por encima del resto de polarizadores.

Los valores de pérdidas de inserción obtenidos a la longitud de onda 550 nm, son relativamente superiores a los obtenidos a longitud de onda de 650 nm para todos los polarizadores, lo cual indica que los polarizadores bajo estudio no se comportan tan bien a frecuencias más altas, como ocurre en este caso.

En la figura 3.7, se muestran los resultados de potencia de salida obtenidos a esta longitud de onda para ambos tipos de detectores:



**Figura 3.7 Potencia de salida a 550 nm con Fotodetector PDA100A-EC y medidor RIFOCS.**



**Figura 3.8 Pérdidas de inserción a 550 nm con fotodetector PDA100A-EC.**

La figura 3.8, muestra el gráfico de las pérdidas de inserción para cada polarizador y para cada estado a esta longitud de onda. Como se puede ver y tal como se comentaba anteriormente, los mejores valores son para el Polarizador Film Cristal y los peores para el polarizador de Plástico Marrón.

### 3.3.3 Medidas con Fuente a Longitud de Onda 850 nm

En el caso de las medidas realizadas para la longitud de onda de 850 nm, se hicieron dos tandas de medidas independientes, una para cada tipo de fuente utilizada. Por un lado, una tanda para la fuente óptica “Diodo Led Avanced Fiber Solutions”, la cual se alimentó mediante un generador con una tensión de 3 voltios. Y por otro lado, una tanda de medidas para la fuente óptica “Diodo Led Ratioplast Optoelectronics”, alimentada con una tensión de 9 voltios y configurada sin Khz y con 40 mA.

Para ambos grupos de mediciones, el detector utilizado para evaluar la potencia a la salida fue el fotodetector PDA100A-EC, es decir, el mismo empleado en los dos apartados anteriores. En este caso, el fotodetector se establece con una ganancia de 50 dB.

En cuanto al montaje realizado, aunque básicamente es el mismo que el descrito al inicio de este capítulo, fue necesario introducir pequeñas alteraciones

motivadas por los elementos utilizados y por la longitud de onda de trabajo en este punto. Así pues, al tratarse en este caso de fuentes led en lugar de fuentes láser, se hizo necesario acoplar una fibra POF a dichas fuentes introduciendo al sistema, de esta forma, la luz que salía de la fibra. Por este mismo motivo, para poder tener un haz de luz coherente como en el caso de una fuente láser, se hizo necesario poner una lente colimadora a la salida de la fibra para así tener un haz de luz adecuado a la entrada del sistema.

A continuación, en la tabla 3.3, se presenta el sumario de las medidas obtenidas en este caso de estudio, y para los dos tipos de fuentes comentados.

Polarizador	Estado	Potencia Salida Fuente Advanced Fiber Solutions [dBm]	Potencia Salida Fuente Ratioplast Optoelectronics [dBm]	Insertion Loss (IL) Fuente Advanced Fiber Solutions [dB]	Insertion Loss (IL) Fuente Ratioplast Optoelectronics [dB]
Film Cristal	Vacío	-19,67	-15,66	0	0
	Con 1 Pol.	-20,87	-16,97	1,20	1,31
	Con 2 Pol. (mín.)	-22,46	-18,41	2,78	2,74
	Con 2 Pol. (máx.)	-22,25	-17,95	2,58	2,28
Film Cristal Alto Contraste	Vacío	-19,67	-15,66	0	0
	Con 1 Pol.	-20,83	-16,94	1,15	1,27
	Con 2 Pol. (mín.)	-22,33	-18,24	2,66	2,58
	Con 2 Pol. (máx.)	-21,88	-17,87	2,21	2,20
Plástico Marrón	Vacío	-19,65	-15,70	0	0
	Con 1 Pol.	-21,31	-17,35	1,65	1,65
	Con 2 Pol. (mín.)	-23,45	-19,50	3,79	3,79
	Con 2 Pol. (máx.)	-22,86	-18,89	3,20	3,18
WGP sin recubrimiento	Vacío	-19,63	-15,63	0	0
	Con 1 Pol.	-23,20	-19,36	3,56	3,72
	Con 2 Pol. (mín.)	-37,34	-37,19	17,71	21,55
	Con 2 Pol. (máx.)	-23,97	-20,11	4,34	4,47
WGP con recubrimiento	Vacío	-19,64	-15,66	0	0
	Con 1 Pol.	-23,36	-19,45	3,72	3,79
	Con 2 Pol. (mín.)	-37,24	-37,02	17,60	21,36
	Con 2 Pol. (máx.)	-24,19	-20,22	4,55	4,56

**Tabla 3.3 Recopilación medidas para distintas fuentes y distintos polarizadores a 850 nm.**

Comparando ambos tipos de fuentes, se puede ver que a pesar de que las potencias de salida son significativamente mayores en el caso de la fuente Ratioplast frente al otro tipo de fuente, motivado por un mayor voltaje de alimentación, si atendemos a las pérdidas de inserción se puede apreciar que los valores son muy similares y en algunos casos prácticamente idénticos, como es el caso de las magnitudes

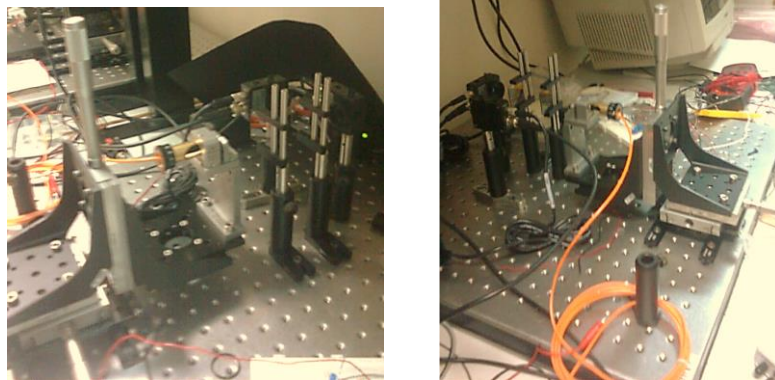
máximas del sistema completo usando el polarizador film cristal de alto contraste o el polarizador WGP con recubrimiento antirreflejante. Esto se puede entender como que el experimento está realizado correctamente y que ambas fuentes ópticas arrojan los mismos resultados relativos.

Por otra lado, si se presta atención a cada polarizador en particular, se aprecia que el peor comportamiento para esta longitud de onda es el del polarizador WGP con recubrimiento antirreflejante seguido de cerca por el WGP sin recubrimiento, con valores en torno a los 4,5 dB de pérdidas de inserción para el sistema completo. En el extremo opuesto, se encuentra el polarizador de film cristal con alto contraste con un resultado en torno a los 2,2 dB, siendo el polarizador que mejor encaja a longitud de onda de 850 nm.

### **3.3.4 Medidas con Fuente a Longitud de Onda 1300 nm**

A la hora de trabajar a longitudes de onda tan altas, como es el caso, 1300 nm, no todos los dispositivos ópticos de entrada y salida son adecuados, puesto que algunos se encuentran limitados por su ventana de trabajo. Es el caso de las fuentes y los detectores/medidores de potencia utilizados previamente para otras longitudes de onda, como el Fotodetector PDA100A-EC y el modelo de “Diodo Led Ratioplast Optoelectronics” del que disponíamos en el laboratorio.

Por ese motivo, para realizar esta parte del experimento fue necesario emplear como fuente óptica el “Diodo Led Avanced Fiber Solutions”, el cual se alimentó con una tensión 3 voltios. En cuanto al Fotodetector utilizado, en este caso, se dispuso de un Fotodetector PDA10CS-EC que fue calibrado a 60 dB de ganancia y cuyo rango de frecuencias de trabajo estaba entre los 700 nm y los 1300 nm, idóneo para el caso de experimento en cuestión. Asimismo, al igual que ocurría en el caso de las fuentes ópticas a 850 nm, fue necesario conectorizar una fibra POF a la fuente e introducir una lente colimadora a la entrada del sistema, entre la fibra y el primer polarizador. En la figura 3.9, se aprecian dos fotografías tomadas del sistema completo para la caracterización de una pareja de polarizadores a longitud de onda de 1300 nm.



**Figura 3.9 Fotografías del banco de trabajo para caracterización de polarizadores a 1300nm.**

En cuanto a los valores obtenidos, en la tabla 3.4, se muestra el resumen de resultados logrados bajo la longitud de onda en estudio y para los cinco distintos modelos de polarizadores.

Polarizador	Estado	Potencia Salida [dBm]	Insertion Loss (IL) [dB]
Film Cristal	Vacío	-29,50	0
	Con 1 Pol.	-29,88	0,38
	Con 2 Pol. (mín.)	-30,44	0,94
	Con 2 Pol. (máx.)	-30,23	0,73
Film Cristal Alto Contraste	Vacío	-29,49	0
	Con 1 Pol.	-29,84	0,35
	Con 2 Pol. (mín.)	-30,33	0,84
	Con 2 Pol. (máx.)	-30,20	0,71
Plástico Marrón	Vacío	-29,477	0
	Con 1 Pol.	-30,11	0,63
	Con 2 Pol. (mín.)	-30,711	1,23
	Con 2 Pol. (máx.)	-30,65	1,17
WGP sin recubrimiento	Vacío	-29,49	0
	Con 1 Pol.	-32,60	3,11
	Con 2 Pol. (mín.)	-41,52	12,03
	Con 2 Pol. (máx.)	-32,91	3,42
WGP con recubrimiento	Vacío	-29,52	0
	Con 1 Pol.	-32,99	3,47
	Con 2 Pol. (mín.)	-41,53	12,01
	Con 2 Pol. (máx.)	-33,86	4,34

**Tabla 3.4 Resumen medidas para distintos polarizadores a 1300 nm.**

Si se examina la tabla, se puede comprobar como para longitud de onda de 1300 nm y para el sistema completo el polarizador que tiene menos pérdidas de

inserción vuelve a ser el polarizador de “Film Cristal de Alto Contraste”, con un valor de 0,71 dB, valor muy cercano al del polarizador “Film Cristal” con el que se logró 0,73 dB de pérdidas. Casi 4 dB por encima, se encuentra el que peor comportamiento mantuvo, el polarizador “WGP con recubrimiento”.

### 3.3.5 Comparativa entre Polarizadores

En este apartado se realiza una comparativa entre los distintos polarizadores caracterizados atendiendo a su respuesta bajo las diferentes longitudes de onda aplicadas. De esta forma, se podrá ratificar, a tenor de los resultados alcanzados qué polarizador es el más adecuado para cada una de ellas.

Para realizar el examen de los polarizadores se van a emplear los resultados recabados, para el sistema completo, de las pérdidas de inserción cuando la potencia obtenida a la salida es máxima. Entendiendo por sistema completo cuando en el montaje se encuentran los dos polarizadores insertados.

Polarizador	Lambda 650 nm	Lambda 550 nm	Lambda 850 nm	Lambda 1300 nm
Film Cristal	2,70	2,22	2,58	0,73
Film Cristal Alto Contraste	1,71	4,58	2,21	0,71
Plástico Marrón	4,24	12,92	3,20	1,17
WGP sin recubrimiento	2,05	4,39	4,34	3,42
WGP con recubrimiento	1,01	4,53	4,55	4,34

**Tabla 3.5 Pérdidas de Inserción de cada polarizador para cada longitud de onda.**

Como ya se ha visto en los apartados anteriores, en algunos casos se han utilizado varias fuentes ópticas a la entrada y varios sensores ópticos a la salida. También se ha comprobado que los resultados son muy similares para una longitud de onda dada independientemente de la fuente o fotodetector empleado.

Así que, para realizar una comparativa entre los diferentes polarizadores más clara, se ha optado por elegir una fuente y un fotodetector para cada longitud de onda, de todas las usadas durante el desarrollo del experimento. A continuación, se especifican las escogidas para cada caso:

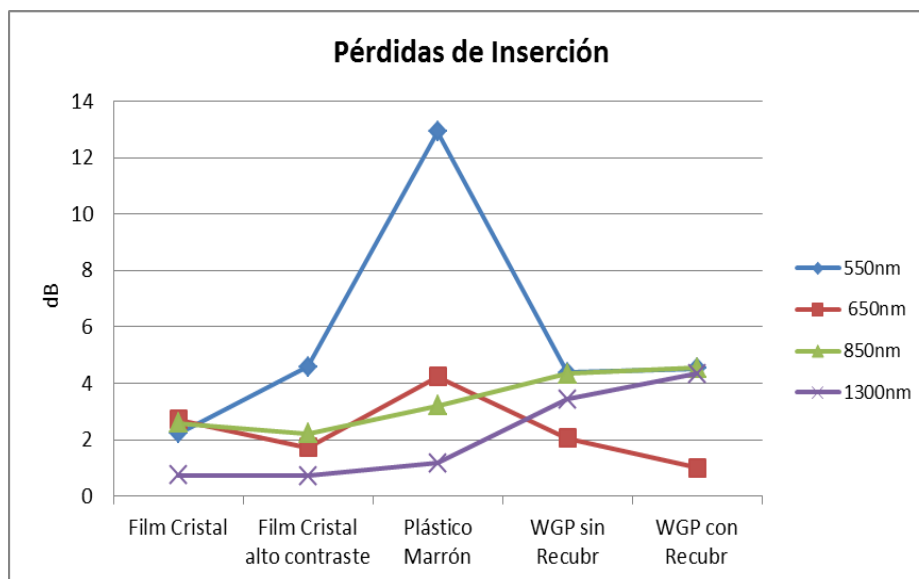
- Lambda 650 nm. Fuente Láser Rojo y fotodetector PDA100A-EC
- Lambda 550 nm. Fuente Láser Verde y fotodetector PDA100A-EC
- Lambda 850 nm. Fuente Diodo Led Advanced Fiber Solutions y fotodetector PDA100A-EC.
- Lambda 1300 nm. Fuente Diodo Led Advanced Fiber Solutions y fotodetector PDA10CS-EC.

Si se examina la tabla 3.5, que recopila las pérdidas de inserción de cada polarizador para cada longitud de onda estudiada, se puede advertir claramente que el polarizador que mejor comportamiento tiene para todo el rango de longitudes de onda sobre el que se ha trabajado es el polarizador Film Cristal con Alto Contraste, comportándose muy bien incluso a bajas frecuencias, seguido de cerca por el otro modelo de polarizador en Film Cristal. No tan bien lo hace, a altas frecuencias como es el caso de la longitud de onda 550 nm, aunque en comparación con los otros polarizadores utilizados vuelve a estar entre los mejores.

En el extremo opuesto, se podría encontrar cualquiera de los dos modelos de polarizador WGP utilizados o el polarizador de Plástico Marrón. Los dos primeros muestran su mejor conducta en el espectro visible a 650 nm mientras que al resto de longitudes de onda empeoran bastante sus resultados. En cuanto al polarizador de Plástico Marrón se aprecia cómo sus pérdidas de inserción disminuyen según se aumenta la longitud de onda utilizada, alcanzando su mejor dato a longitud de onda de 1300 nm.

En la próxima gráfica, 3.10, se muestran las pérdidas de inserción descritas en la tabla 3.5, de modo más visual.





**Figura 3.10 Recopilación pérdidas inserción polarizadores a todas las lambdas.**

Resumiendo, si hubiese que elegir un polarizador que cubra al completo, con una buena respuesta, el rango de longitudes de onda estudiadas sería el polarizador Film Cristal con Alto Contraste. En cambio, si hubiese que elegir un polarizador para cada longitud de onda, serían el polarizador Film Cristal para 550 nm, el polarizador WGP con Recubrimiento para 650 nm y el polarizador Film Cristal con Alto Contraste para las lambdas 850 nm y 1300 nm.

## 4. Caracterización de Polarizing Beam Splitters

En este capítulo, se procede a detallar la segunda parte del experimento llevado a cabo en el laboratorio. En este caso, se trata de analizar el modo de actuar de distintos modelos de PBS a longitudes de onda de 550 nm, 650 nm, 830 nm, y 1300 nm. De esta forma, por un lado, se especifican los diferentes elementos empleados y por otro lado, al igual que ocurría en el capítulo anterior se describe el montaje experimental de caracterización realizado en el banco de trabajo, particularizado para el estudio de PBS, y se presentan los resultados obtenidos.

Así, en primer lugar, en el apartado 4.1 se identifican los componentes empleados, Polarizers Beam Splitters, fuentes ópticas y medidores de potencia, que se han empleado a la hora de efectuar las lecturas. Continuando, en el apartado 4.2 se muestra el esquema del montaje del sistema completo realizado. En el apartado 4.3 se presenta el procedimiento adoptado en la toma de valores y en los subapartados 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 y 4.3.4 se ahonda de manera detallada y particular en los resultados obtenidos para cada longitud de onda bajo estudio, comprobando el comportamiento de cada uno de los PBS caracterizados. Y finalmente, en el subapartado 4.3.5 se realiza una comparativa de las características de cada PBS en base a los resultados.

### 4.1 Componentes Empleados

#### Polarizers Beam Splitter

En este caso, se dispuso de 4 modelos diferentes de PBS para realizar su estudio y caracterización. Se presentan a continuación:

- ❖ PBS Cubo 450 nm-650 nm
- ❖ PBS Cubo 650 nm-850 nm
- ❖ WGP PBS02A sin Recubrimiento Antirreflejante

- ❖ WGP PBS02C con Recubrimiento Antirreflejante

## **Fuentes Ópticas**

- ❖ Láser Rojo (650 nm), sin conectorizado en fibra
- ❖ Láser Verde (550 nm), sin conectorizado en fibra
- ❖ Diodo Led RatioPlast Optoelectronics (850 nm) conectorizado en fibra
- ❖ Diodo Led Advanced Fiber Solutions (850 nm) conectorizado en fibra
- ❖ Diodo Led Advanced Fiber Solutions (1300 nm) conectorizado en fibra

## **Medidores**

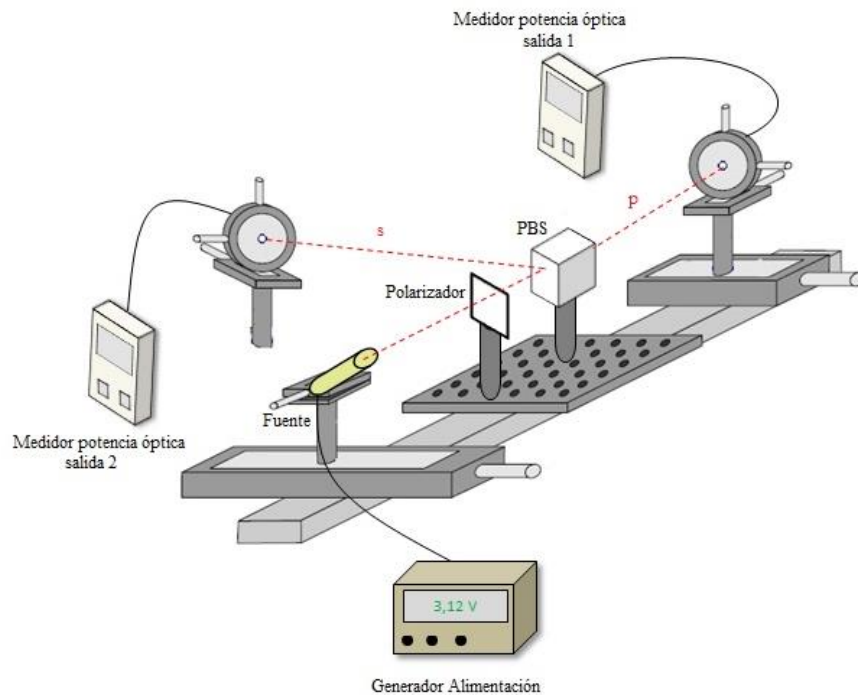
- ❖ Fotodetector de ganancia modelo PDA100A-EC
- ❖ Fotodetector de ganancia modelo PDA10CS-EC

## **Polarizadores**

- ❖ Polarizador Film Cristal con Alto Contraste

## **4.2 Montaje Experimental**

En este apartado, figura 4.1, se presenta el esquema del montaje completo efectuado para la caracterización de PBS, variando en cada caso los tipos de PBS y fuentes a la entrada y medidores o fotodetectores a la salida del mismo, tal y como se especifica en los siguientes apartados.



**Figura 4.1 Esquema del sistema completo para caracterización de PBS.**

Como se puede apreciar, en este caso, a diferencia del montaje confeccionado para la caracterización de polarizadores, el sistema consta de un polarizador y un PBS así como de dos salidas, una para la componente p del rayo de luz y otra para la componente s. El mismo tipo de medidor de potencia o fotodetector es el que se coloca tanto en la salida 1 como en la salida 2.

### 4.3 Resultados de Caracterización de los PBS

El procedimiento común establecido para la caracterización de los diversos PBS es el que se describe a continuación:

- En primer lugar, se realizó la medida de la potencia óptica de salida de la fuente óptica en vacío, es decir, tan solo poniendo la fuente óptica a la entrada y el medidor de potencia a la salida.

- Posteriormente, se realizó la medida de la potencia óptica de salida introduciendo un polarizador a la entrada y ajustando la posición de dicho polarizador de tal manera que se tuviese la máxima potencia en la salida 1.
- El tercer paso, fue montar el sistema completo, es decir, introduciendo entre el polarizador de entrada y la salida un PBS. De esta forma, se midió en ambas salidas la potencia obtenida.
- El siguiente y último paso, fue retirar el polarizador y mantener sólo el PBS y de esta forma medir en las salidas 1 y 2 la potencia obtenida, perteneciente a cada una de las componentes  $p$  y  $s$ .

Cada uno de los puntos descritos anteriormente se repitió para las diferentes longitudes de onda, fuentes ópticas, PBS y medidores de potencia empleados. Además, para poder disponer de un mayor conjunto de datos y de una información más completa, el procedimiento se realizó también para 3 distintas posiciones de la fuente ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $45^\circ$ ).

Aunque finalmente se disponía de 3 grupos de valores, correspondientes a cada una de las posiciones de la fuente para cada elemento PBS, sólo se analizan los datos relacionados con la posición de la fuente  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , por considerarse que a  $45^\circ$  los datos son demasiado obvios y no aportan demasiada información (se obtiene la mitad de la potencia por cada salida). Aun así, en el anexo incluido junto al presente proyecto, se puede revisar los valores de potencia obtenidos en esta posición de la fuente.

En cuanto al análisis de los resultados, los parámetros utilizados para medir la calidad de los diversos polarizer beam splitters, no van a ser exactamente los mismos que en el caso de la caracterización de polarizadores. Debido a que en un PBS, no tenemos una sola salida, sino dos, una con polarización  $p$  y otra con polarización  $s$ , se hace necesario calcular unas relaciones entre ellas, que en el caso de los polarizadores del apartado anterior no se contemplaba. Se trata de las *pérdidas de inserción  $p$*  ( $IL_p$ ), las *pérdidas de inserción  $s$*  ( $IL_s$ ) y el *Extinction Ratio* ( $ER$ ).

- ✓ **Pérdidas de inserción p:** se han considerado estas pérdidas de inserción como la relación entre  $P_{in}$  y  $P_{out}$ , donde:
  - **Pin:** potencia obtenida en la salida 1 con la fuente óptica a  $0^\circ$  con sólo el polarizador en el sistema.
  - **Pout:** potencia obtenida en la salida 1 con la fuente óptica a  $0^\circ$  con el polarizador y el PBS en el sistema.
  
- ✓ **Pérdidas de inserción s:** se han considerado estas pérdidas de inserción como la relación entre la  $P_{in}$  y  $P_{out}$ , donde:
  - **Pin:** potencia obtenida en la salida 1 con la fuente óptica a  $90^\circ$  con sólo el polarizador en el sistema.
  - **Pout:** potencia obtenida en la salida 2 con la fuente óptica a  $90^\circ$  con el polarizador y el PBS en el sistema.
  
- ✓ **Extinction Ratio:** es un parámetro descrito en la hoja de características de los PBS y que se define como la proporción entre  $P_{out_p}$  y  $P_{out_s}$ , siendo:
  - **Pout<sub>p</sub>:** potencia obtenida en la salida 1 con la fuente óptica a  $0^\circ$  con el polarizador y el PBS en el sistema.
  - **Pout<sub>s</sub>:** potencia obtenida en la salida 1 con la fuente óptica a  $90^\circ$  con el polarizador y el PBS en el sistema.

Por otro lado, un punto importante a destacar es que, por sus características y sus buenos resultados para prácticamente todas las longitudes de onda, el polarizador empleado en este apartado para todas las longitudes de onda y para todos los PBS bajo estudio fue el polarizador Film Cristal con Alto Contraste. Éste, consiguió las mejores pérdidas de inserción para las longitudes de onda de 850 y 1300 nm y buenos valores para las otras dos frecuencias, así que se consideró que era el mejor candidato para ser utilizado en esta parte del proyecto.

### 4.3.1 Medidas con Fuente Láser Rojo

Para las medidas realizadas con el láser rojo, a longitud de onda de 650 nm, se alimentó dicha fuente mediante un generador con una tensión de 2,6 voltios. En este caso, al contrario que en la caracterización de polarizadores, sólo se emplea un tipo de sensor de potencia a la salida, el fotodetector PDA100A-EC tanto para la salida 1 como para la salida 2. Éstos fueron calibrados con una ganancia de 20dB. Por tanto, el cálculo necesario para obtener la potencia de salida es el mismo que se describe en el apartado 3.3.1.

Las potencias obtenidas para cada caso no se van a mostrar en las tablas resumen, se pueden comprobar en el anexo adjuntado con el proyecto. En cambio, en este caso se muestra una tabla resumen, tabla 4.1, con las pérdidas de inserción p, las pérdidas de inserción s y el Extinction Ratio para cada uno de los PBS en estudio bajo la longitud de onda de 650 nm.

PBS	Insertion Loss p (ILp) [dB]	Insertion Loss s (ILs) [dB]	Extinction Ratio [dB]
Cubo PBS 450-680nm	0,328	1,132	12,740
Cubo PBS 680-850nm	0,276	0,335	24,909
Cubo WGP PBS02A	0,567	0,287	18,629
Cubo WGP PBS02C	0,881	0,400	23,279

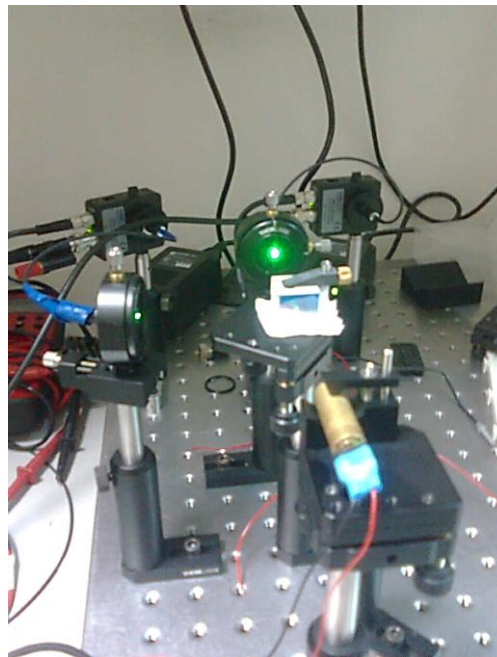
**Tabla 4.1 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.**

Revisando la tabla anterior, se puede apreciar que el PBS que mejor respuesta tiene a esta longitud de onda es el PBS 680-850 nm, puesto que tiene unas pérdidas de inserción bajas tanto para la polarización p como la polarización s, además de tener el mayor valor para el parámetro extinction ratio lo que nos indica que su capacidad filtrando es buena, ya que en la salida 1 se presenta poca potencia de la polarización s. Quizás el peor parado a esta lambda sea el PBS 450-680 nm, que presenta buenas pérdidas de inserción p, pero malos resultados para la polarización s y el ER.

### 4.3.2 Medidas con Fuente Láser Verde

Para las medidas realizadas con el láser verde, a longitud de onda de 550 nm, se alimentó dicho láser mediante un generador con una tensión de 2,6 voltios. En este caso, de nuevo se vuelve a emplear solamente un tipo de sensor de potencia a la salida, el fotodetector PDA100A-EC tanto para la salida 1 como para la salida 2. Éstos fueron calibrados con una ganancia de 20dB.

En la siguiente imagen, figura 4.2, se muestra una foto del montaje real realizado en el banco de trabajo del laboratorio para esta longitud de onda. En ella, se aprecia la fuente láser verde, uno de los PBS, y los fotodetectores en ambas salidas conectados mediante una POF a unos diafragmas.



**Figura 4.2 Foto real montaje caracterización PBS a 550 nm.**

A continuación, se presenta una síntesis de los valores recabados a 550 nm para los distintos PBS. Tabla 4.2.



PBS	Insertion Loss p (ILp) [dB]	Insertion Loss s (ILs) [dB]	Extinction Ratio [dB]
Cubo PBS 450-680nm	0,365	8,958	8,318
Cubo PBS 680-850nm	0,927	10,920	7,118
Cubo WGP PBS02A	0,720	7,085	14,174
Cubo WGP PBS02C	0,610	7,178	9,977

**Tabla 4.2 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.**

A esta longitud de onda, para todos los modelos de PBS, las ILs son algo más altas en relación a las obtenidas para la anterior longitud de onda y el ER más bajo en todos los casos. En cuanto a las ILp, los valores son también superiores aunque con muy poca diferencia.

En este caso, por tanto, no destaca ninguno de los PBS, pero si hubiese que elegir uno entre los caracterizados, quizás sería el modelo WGP PBS02A que aunque no obtiene unos valores especialmente buenos, es el que mejor comportamiento tiene en general, con las menores ILs y el mayor ER en comparativa con los demás modelos. Si se atendiera sólo a las ILp el que mejor resultado presenta es el modelo PBS 450-680 nm como cabría esperar.

### **4.3.3 Medidas con Fuente a Longitud de Onda 850 nm**

Para el experimento realizado a  $\lambda$  850 nm, se utilizaron dos fuentes ópticas diferentes para poder comparar los resultados. Se trata, al igual que ocurría en el apartado de los polarizadores, de la Fuente Diodo Led Advanced Fiber Solutions y de la Fuente Diodo Led RatioPlast Optoelectronics, conectorizadas en ambos casos en fibra. En el primer tipo de fuente se alimentó la misma con una tensión de 3 voltios, mientras que en el segundo tipo se hizo con una tensión de 9 voltios y 40 mA. En cuanto a los fotodetectores empleados en ambas salidas volvieron a ser el modelo PDA100A-EC ajustados a 50 dB de ganancia en ambos casos.

En este caso, se vuelve a tratar con fuentes led en lugar de fuentes láser, por tanto, fue necesario de nuevo acoplar una fibra POF a dichas fuentes introduciendo al sistema la luz saliente de la fibra. Asimismo, se incluyó de nuevo la lente colimadora a la salida de la fibra para así tener un haz de luz coherente a la entrada del sistema.

En la tabla 4.3, se recopilan las pérdidas de inserción para la polarización p y la polarización s así como el extinction ratio a longitud de onda 850 nm y para el caso de la fuente Advanced Fiber Solutions.

PBS	Insertion Loss p (ILp) [dB]	Insertion Loss s (ILs) [dB]	Extinction Ratio [dB]
Cubo PBS 450-680nm	0,526	12,350	0,284
Cubo PBS 680-850nm	0,129	0,082	13,379
Cubo WGP PBS02A	1,375	0,921	12,338
Cubo WGP PBS02C	1,072	1,614	12,908

**Tabla 4.3 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.**

Queda evidente en el resumen anterior que, en este caso, el peor PBS para longitud de onda de 850 nm es el PBS 450-680 nm. Si se presta atención, se puede ver que para la componente p se comporta de manera aceptable, aunque por el contrario, para la componente s tiene unas altas pérdidas de inserción así como un ER muy bajo, que implica que en la salida 1 tendríamos un nivel alto de potencia correspondiente a la polarización s.

En el extremo opuesto, y con clara diferencia con respecto a los demás, se encuentra el PBS 680-850 nm. Obtiene las mejores pérdidas de inserción para ambas componentes de polarización y el mejor ER del grupo.

Por otro lado, en la tabla 4.4, se tienen los valores calculados para el caso de la fuente RatioPlast Optoelectronics.

PBS	Insertion Loss p (ILp) [dB]	Insertion Loss s (ILs) [dB]	Extinction Ratio [dB]
Cubo PBS 450-680nm	0,468	12,746	0,232
Cubo PBS 680-850nm	0,104	0,073	16,735
Cubo WGP PBS02A	1,304	0,755	16,477
Cubo WGP PBS02C	1,079	1,615	16,621

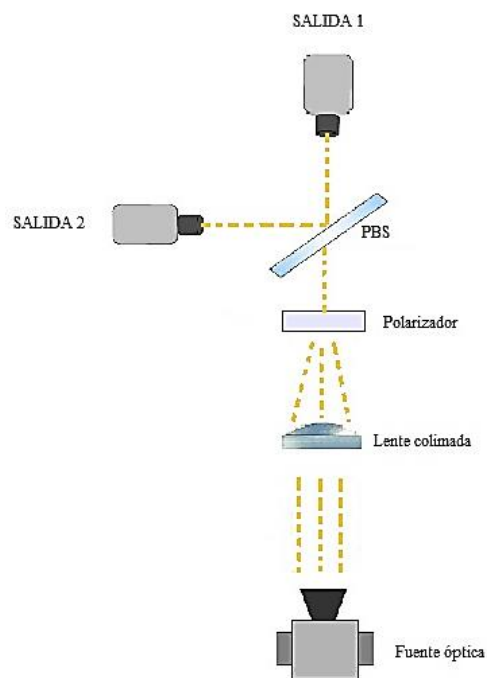
**Tabla 4.4 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.**

A la vista de los números, se observa que los valores obtenidos van en la misma línea que los recabados en la tabla 4.3 para el otro tipo de fuente y por tanto los resultados comparativos entre los distintos tipos de PBS son los mismos. Dicho esto, se puede afirmar que independientemente del modelo de fuente que se utilice, el resultado final sería el mismo.

#### **4.3.4 Medidas con Fuente a Longitud de Onda 1300 nm**

Como ocurría en el apartado de la caracterización de polarizadores, para trabajar a longitud de onda de 1300 nm, fue necesario utilizar como fuente óptica el “Diodo Led Advanced Fiber Solutions”, alimentado con una tensión 3 voltios y como fotodetector el modelo PDA10CS-EC ajustado a 60 dB de ganancia, motivado por las limitaciones de la ventana de trabajo de las otras fuentes y fotodetectores de los que disponíamos en el laboratorio. Asimismo, al igual que ocurría en el caso de las fuentes ópticas a 850 nm, fue necesario conectorizar una fibra POF a la fuente e introducir una lente colimada a la entrada del sistema, entre la fibra y el primer polarizador.

En la figura 4.3, se puede ver un esquema simple, extrapolable a los casos en los que fue necesario emplear una lente colimada debido a la naturaleza de la luz introducida a la entrada.



**Figura 4.3 Esquema caracterización PBS con haz de luz no coherente y lente colimada.**

En la tabla siguiente, tabla 4.5, se recapitulan las pérdidas de inserción para la polarización p y la polarización s así como el extinction ratio a longitud de onda de 1300 nm y para el caso de la fuente empleada en este caso, Advanced Fiber Solutions.

PBS	Insertion Loss p (ILp) [dB]	Insertion Loss s (ILs) [dB]	Extinction Ratio [dB]
Cubo PBS 450-680nm	0,986	13,771	0,059
Cubo PBS 680-850nm	0,204	7,383	0,714
Cubo WGP PBS02A	0,180	0,785	8,583
Cubo WGP PBS02C	0,222	1,089	8,511

**Tabla 4.5 Resumen de pérdidas de inserción y extinction ratio para distintos PBS.**

A la vista de la tabla, se puede advertir cómo los valores resultantes para esta frecuencia son relativamente peores en todos los casos si los comparamos con los obtenidos para otras longitudes de onda. En este caso tenemos, por una parte, los PBS

que mejor responden, modelos WGP PBS02A y PBS02C que presentan valores muy similares para los tres parámetros, aunque un poco mejores los del primero. Y por otra parte, los que peor comportamiento presentan, que tienen valores muy bajos para el ER y valores altos de pérdidas de ILs.

### **4.3.5 Comparativa entre PBS**

En este apartado, se presenta una comparativa entre los distintos Polarizers Beam Splitter analizados atendiendo a los resultados recogidos para las diferentes longitudes de onda durante el experimento. De este modo, se podrá concluir, a tenor del rendimiento alcanzado qué elemento PBS es el más adecuado para cada una de ellas.

Para realizar el examen de los diferentes PBS se van a emplear los resultados recabados, y que han sido ya presentados para cada caso particular, de las pérdidas de inserción p (ILp), las pérdidas de inserción s (ILs) y el Extinction Ratio.

Como ocurría con la caracterización de polarizadores, en algunos casos se han utilizado varias fuentes ópticas a la entrada, que según se ha podido comprobar arrojan resultados casi idénticos para una longitud de onda dada. Así que, en este caso se ha elegido la fuente y el fotodetector siguientes:

- Lambda 650 nm. Fuente Láser Rojo y fotodetector PDA100A-EC
- Lambda 550 nm. Fuente Láser Verde y fotodetector PDA100A-EC
- Lambda 850 nm. Fuente Diodo Led Advanced Fiber Solutions y fotodetector PDA100A-EC.
- Lambda 1300 nm. Fuente Diodo Led Advanced Fiber Solutions y fotodetector PDA10CS-EC.

Si se uniesen las tablas para cada longitud de onda, se podría advertir que si se tuviese que escoger un PBS para todo el rango de frecuencias estudiado, éste podría ser el PBS WGP PBS02A. Presenta un buen comportamiento, en general, para todas las longitudes de onda, en especial a frecuencias altas y bajas. Incluso el WGP PBS02C,

podría ser otra opción, ya que a algunas frecuencias genera valores similares a los del anterior.

En cuanto a los otros dos tipos de PBS, el PBS 450-680 nm se comporta medianamente bien en su rango de frecuencias de trabajo, en especial a 550 nm, pero sin embargo, para el resto de frecuencias su comportamiento es algo desdeñable.

Al modelo PBS 680-850 nm, le ocurre algo similar. Su funcionamiento es bastante adecuado para las longitudes de onda de 650 y 850 nm, pero para las otras dos frecuencias sus resultados son algo insuficientes.

## 5. Caracterización de Cristales Líquidos

En este capítulo, se plantea la tercera parte del experimento llevado a cabo en el laboratorio. Consiste en exponer la caracterización de dos células de cristal líquido mediante un montaje experimental específico y en el análisis de los datos resultantes. En concreto, se analiza el modo de actuar de dos modelos de células de cristal líquido a longitud de onda de 650 nm midiendo sobre sus 3 píxeles, siguiendo las pautas que se exponen en el apartado 5.3.

De esta forma, siguiendo la misma estructura que para el resto de elementos caracterizados, en primer lugar se especifican los diferentes elementos empleados; en segundo lugar se describe el montaje experimental de caracterización realizado en el banco de trabajo particularizado para el estudio del cristal líquido; finalmente, se presentan los resultados obtenidos.

Así, en el apartado 5.1 se identifican los elementos, células de cristal líquido, fuentes ópticas y medidores de potencia, que se han empleado a la hora de efectuar las lecturas en el apartado 5.2 se muestra el esquema del montaje realizado para caracterizar las células de cristal líquido. En el apartado 5.3 se presenta el procedimiento adoptado en la toma de valores y se presentan de manera detallada los resultados recabados.

### 5.1 Componentes Empleados

#### Células de Cristal Líquido

En este caso, se emplearon dos tipos de células de cristal líquido nemáticos torsionados (TN-LC) para realizar la caracterización. Aunque se trata del mismo tipo de célula, al tratarse de células de cristal líquido diseñadas y fabricadas a mano, como se indica en el apartado 5.2.1, se pueden comparar entre sí los resultados obtenidos para

ambas para comprobar si su respuesta es la misma. La célula de cristal líquido empleada es la siguiente:

- ❖ Tipo célula no 3 (rango 850 -1300 nm). Las denominaremos P2 y P5

### Fuente Óptica

- ❖ Láser Rojo (650 nm), sin conectorizado en fibra (Power Technology Inc)

### Medidores

- ❖ Medidor de potencia óptica (Rifocs 557B)

### Polarizadores

- ❖ WGP sin Recubrimiento Antirreflejante (WGP sin AR (PPL04A))

## 5.2 Montaje Experimental

En este apartado, se presenta el esquema del montaje realizado para la caracterización de cristales líquidos.

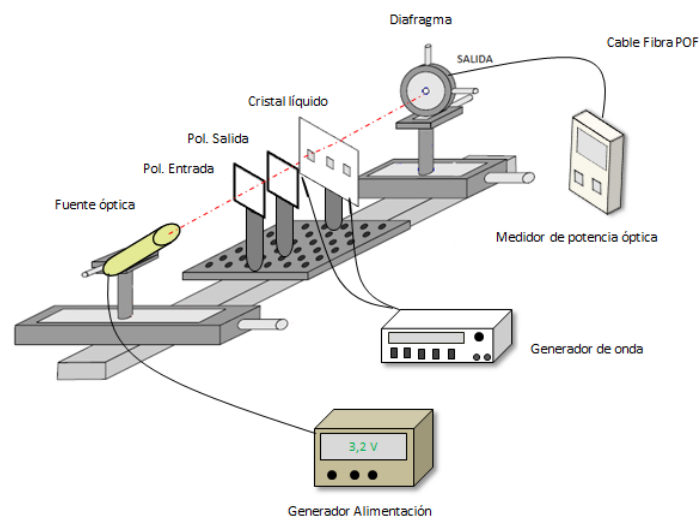


Figura 5.1 Esquema del montaje para caracterización de cristales líquidos.



Como se puede apreciar en la figura 5.1, en este caso, se tiene una entrada y una salida, dos polarizadores (una de entrada y otro de salida) y la célula de cristal líquido a caracterizar. Alimentando el cristal líquido, se tiene un generador de onda cuyo efecto sobre dicho cristal es la conmutación de sus píxeles del estado ON al estado OFF, o viceversa, según se le aplique una tensión u otra.

### **5.3 Procedimiento de Caracterización del cristal líquido**

El procedimiento adoptado para la realización de las medidas de este apartado se describe a continuación:

- Paso 1. Se inserta el polarizador de entrada y se coloca de tal forma que se obtenga la potencia máxima a la salida.
- Paso 2. Se inserta el polarizador de salida a continuación del polarizador de entrada y se busca la posición para obtener la potencia mínima posible a la salida.
- Paso 3. Con los polarizadores en la posición del paso 2, se inserta la célula de cristal líquido y se hace incidir el haz de luz sobre un píxel de dicha célula al mismo tiempo que se va variando la tensión aplicada con el generador de tensión sobre el cristal líquido.
- Paso 4. Igual que el paso 2 pero buscando la posición para obtener la máxima potencia a la salida.
- Paso 5. Con los polarizadores en la posición del paso 4, se inserta la célula de cristal líquido y se hace incidir el haz de luz sobre un píxel de dicha célula al mismo tiempo que se va variando la tensión aplicada con el generador de tensión sobre el cristal líquido.

Los pasos 3 y 5 se repiten para cada uno de los 3 píxeles de los que estaba compuesta la célula de cristal líquido, teniendo de esta manera, 6 tandas de potencias resultantes, dos para cada uno de los píxeles.

Los parámetros empleados para la caracterización son las pérdidas de inserción (IL) definidas en el apartado 3.3.

### 5.3.1 Medidas Cristal Líquido

Como se ha comentado anteriormente, para las medidas realizadas en este apartado se empleó una fuente láser rojo a longitud de onda de 650 nm alimentada con una tensión de 3,2 voltios. En cuanto a la pareja de polarizadores empleados, se trató del tipo WGP sin Recubrimiento Antirreflejante. A la salida se encontraba el medidor de potencia Rifocs, con el que se obtuvieron las potencias directamente en dBm. La célula de cristal líquido era del tipo TN-LC con tres píxeles alimentada con un generador de onda marca HP con una señal cuadrada de 10Khz de frecuencia y con una tensión de 0 a 5 voltios eficaces (Veff), con pasos de 0,5 Veff para cada medida.

En la tabla 5.1, se presentan los datos de las pérdidas de inserción para la célula de cristal llamada P5, de todos sus píxeles y para los casos en los que el polarizador de salida se encuentra en la posición de máximo y de mínimo de potencia.

Voltaje Eff	IL [dB] Píxel Central		IL [dB] Píxel Izquierdo		IL [dB] Píxel Derecho	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
0,5	21,06	0,25	17,52	0,02	11,57	0,07
1	19,31	0,21	17,49	0,04	10,46	0
1,5	22,43	0	18,97	0	13,16	0,51
2	18,77	0,22	22,1	0,1	10,7	0,36
2,5	1,64	5,35	18,18	0,01	1,66	4,79
3	0,22	12,24	5,6	1,95	0,6	10,31
3,5	0,21	21,12	0,42	6,86	0,13	13,89
4	0,14	24,91	0,06	12,7	0	18,03
4,5	0,05	23,43	0,18	19,47	0,07	21,08
5	0	22,18	0	23,61	0,14	22,61

**Tabla 5.1 Resumen IL para los tres píxeles de la célula P5.**

En la figura 5.2, se presentan los gráficos de la potencia obtenida para cada píxel dependiendo de la tensión aplicada al cristal líquido P5. “Psal estado mín” es la tanda de valores obtenidos cuando el polarizador de salida se encuentra en la posición de potencia mínima y “Psal estado máx” se trata del set de valores obtenidos cuando se encuentra en la posición de potencia máxima.

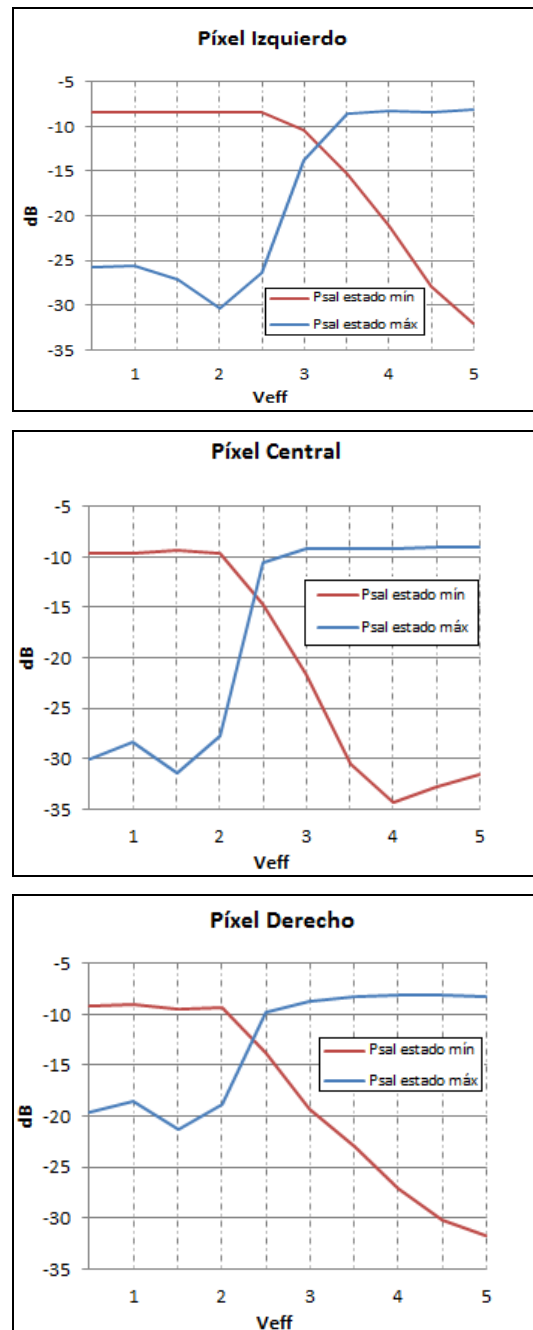


Figura 5.2 Potencia salida frente a la tensión aplicada LC P5.

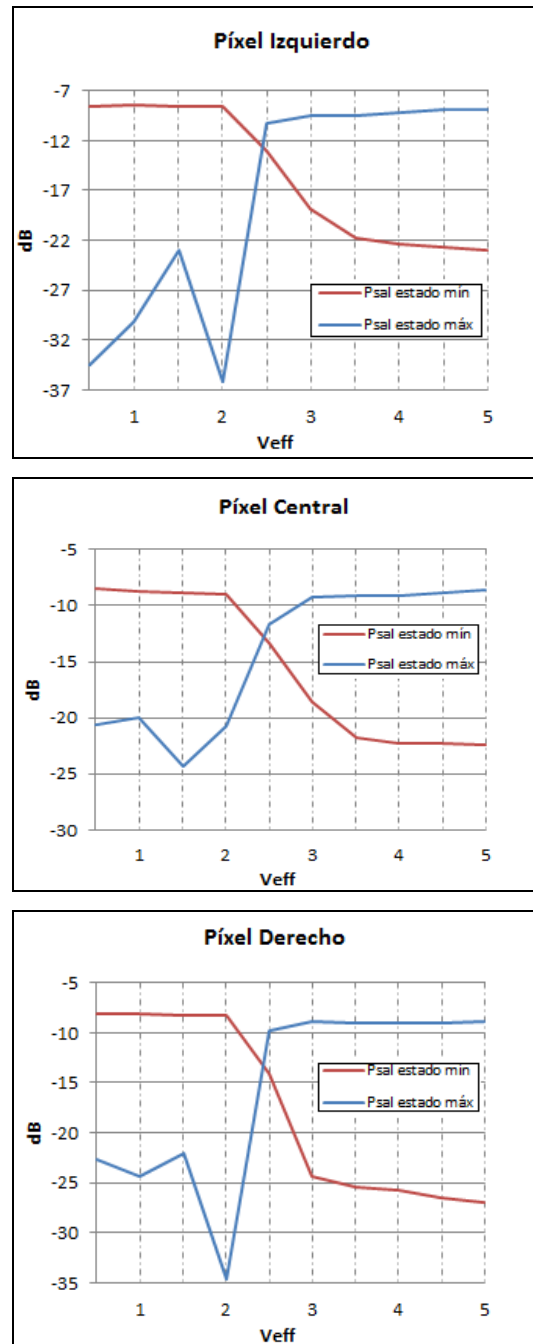
Como se puede apreciar, los píxeles conmutan del estado OFF al estado ON entre los 2 y los 4 Veff, siendo más rápida dicha conmutación en algunos casos, por ejemplo, en el caso del píxel derecho o el píxel central.

Por otro lado, en la tabla 5.2, se presentan los datos de las pérdidas de inserción para la célula de cristal llamada P2, de todos sus píxeles y para las dos posiciones del polarizador de salida comentadas, máximo y mínimo de potencia.

Voltaje Eff	IL [dB] Píxel Central		IL [dB] Píxel Izquierdo		IL [dB] Píxel Derecho	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
0,5	12,01	0	25,54	0,17	13,90	0
1	11,41	0,29	21,25	0	15,54	0,04
1,5	15,81	0,37	14,00	0,17	13,25	0,30
2	12,14	0,5	27,22	0,16	25,81	0,19
2,5	3,05	4,93	1,28	4,52	0,97	6,10
3	0,73	10,18	0,5	10,41	0	16,35
3,5	0,6	13,36	0,49	13,33	0,16	17,36
4	0,57	13,9	0,18	14,01	0,17	17,70
4,5	0,29	13,88	0,01	14,28	0,15	18,41
5	0	14,01	0	14,61	0,13	18,95

**Tabla 5.2 Resumen IL para los tres píxeles de la célula P2.**

En la figura 5.3, se presentan los gráficos de la potencia obtenida para cada píxel dependiendo de la tensión aplicada al cristal líquido P2. “Psal estado mín” es la tanda de valores obtenidos cuando el polarizador de salida se encuentra en la posición de potencia mínima y “Psal estado máx” se trata del set de valores obtenidos cuando se encuentra en la posición de potencia máxima. Como se puede apreciar, los píxeles vuelven a conmutar entre los 2 y los 4 Veff. En el caso de los píxeles izquierdo y derecho, la conmutación es menos gradual que el caso del píxel central como se puede advertir analizando las gráficas entre los 2 y 3 Veff.



**Figura 5.3 Potencia salida frente a la tensión aplicada LC P2.**

Revisando la tabla 5.1 y la tabla 5.2, se puede observar que los resultados para las pérdidas de inserción son muy parecidos, como era de esperar, aunque las pérdidas de inserción de la célula P2, son algo más pequeñas en su mayoría. Esto puede ser debido a su proceso de fabricación realizada a mano y no mediante procesos automatizados industriales.

## 6. Conmutador Óptico basado en cristal líquido

En este capítulo, se plantea la cuarta y última parte del estudio llevado a cabo en el laboratorio. Se propone y analiza un novedoso conmutador óptico multifunción basado en cristal líquido, capaz de trabajar en un amplio rango de longitudes de onda y adecuado tanto para redes POF como GI-POF. De igual manera que en capítulos anteriores, tanto los componentes empleados como el montaje experimental son descritos. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos.

### 6.1 Conmutador Óptico Multifunción basado en LC

En este apartado, se propone y se analiza un conmutador óptico multifunción basado en cristal líquido, capaz de trabajar en un amplio rango de longitudes de onda y adecuado tanto para redes POF como GI-POF. En la figura 6.1, se observa el esquema general del conmutador, con la definición de sus entradas y salidas, incluidos los puertos. [PeCL]

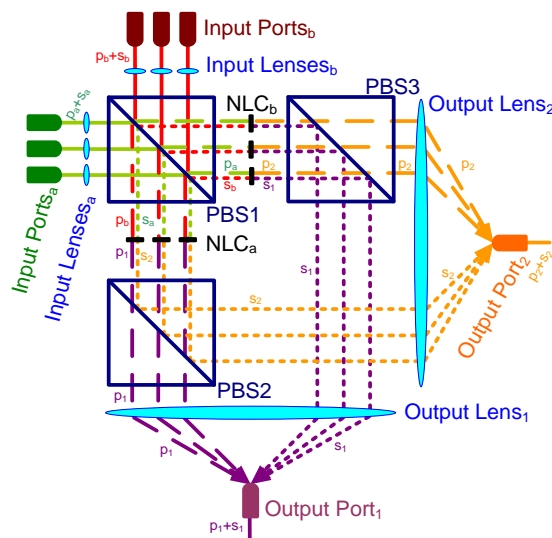


Figura 6.1 Estructura del Conmutador Óptico basado en cristal líquido.

El sistema propuesto, se compone de hasta 6 puertos de entrada y dos de salida. En cuanto a los elementos ópticos integrados, se tienen lentes tanto en entrada como en salida, 3 PBS de mismo tipo y 2 células de cristal líquido, todo dispuesto como se aprecia en la figura 6.1. Adicionalmente, tanto en entrada o en salida se pueden utilizar fibras POF o GI-POF.

Con respecto a su funcionamiento, el conmutador es capaz de manejar tanto las polarizaciones p como s, con lo que las pérdidas se reducen. El PBS1 situado a la entrada divide el haz de luz de cada puerto de entrada en dos componentes independientes, transmitiendo la componente p y reflejando la componente s a 45°. Ambas componentes pasan por una de las células de cristal líquido y después llegan a los siguientes PBS, PBS2 y PBS3. Éstos, vuelven a dividir el haz de luz en dos componentes y las redirigen hacia una u otra salida. Las lentes colocadas en cada salida, recogen las componentes del rayo recibidas y las enfocan hacia su respectivo puerto de salida. [PeCL]

El conmutador propuesto en la figura 6.2, se trata de un conmutador avanzado, con múltiples entradas y salidas así como múltiples posibilidades, quedando fuera del alcance del presente proyecto su análisis y funcionamiento completo. Por tanto, por simplicidad y para comprobar su comportamiento a nivel general, fue suficiente con el análisis para dos entradas y dos salidas del mismo. Por ello, aunque el montaje realizado en el banco de caracterización fue el mismo, sólo se caracterizó el píxel central de cada pareja de cristales haciendo incidir sobre ellos la luz proveniente de un puerto de la entrada 1 y de un puerto de la entrada 2 y midiendo la potencia obtenida en las salidas 1 y 2.

En el apartado 6.2 se identifican los elementos, células de cristal líquido, fuentes ópticas y medidores de potencia, que se han empleado a la hora de efectuar las lecturas. En el apartado 6.3 se muestran imágenes del montaje realizado para la caracterización. Finalmente en el apartado 6.4 se presentan de manera detallada los resultados recabados.

## 6.2 Componentes Empleados

### Células de Cristal Líquido

Para realizar la caracterización se emplearon 3 parejas de cristales líquidos nemáticos torsionados. Cada pareja con unas características y propiedades diferentes a las otras. Estas células fueron fabricadas y diseñadas por el Doctor Pedro Contreras Lallana bajo supervisión del señor B. Vinouze durante su estancia de investigación en Telecom Bretagne, Brest (Francia). Se fabricaron 4 tipos de células de TN-LC con un contraste mayor a 20 o 30 dB para los tres siguientes rangos de longitudes de onda: de 800 nm a 1300 nm, de 400 nm a 800 nm y de 600 nm a 1300 nm.

Dos mezclas de cristal líquido se consideraron adecuadas para el diseño del sistema y poder alcanzar los parámetros requeridos:

- ✓ Ref A no es una mezcla convencional de LC, con una muy alta birrefringencia, 0.38 a 633 nm.
- ✓ Ref B es una mezcla de LC empleada en aplicaciones de telecomunicaciones, con una alta birrefringencia, 0.224 a 633 nm.
- ✓ Ref C es una mezcla de LC utilizada, a menudo, en aplicaciones de displays con una baja birrefringencia, 0.105 a 633 nm.

La última mezcla se descartó por no considerarse adecuada para esta aplicación. Las 4 configuraciones propuestas, utilizando las otras dos mezclas, se muestran en la tabla 6.1. [PeCL]

Tipo célula	Rango Longitud de Onda	Grosor de la Célula	Mezcla de LC	Contraste esperado
no 1	400nm – 1300nm	7 $\mu$ m	Ref A	20dB
no 2	400nm – 1300nm	11 $\mu$ m	Ref B	20 dB
no 3	850nm – 1300nm	11 $\mu$ m	Ref A	30dB
no 4	400nm – 850nm	15 $\mu$ m	Ref A	30dB

**Tabla 6.1 Características de las células de LC fabricadas.**



Explicado el origen de las células de cristal líquido, a continuación se enumeran las tres parejas utilizadas:

- ❖ Pareja tipo de célula no 1 (rango 400 nm-1300 nm)
- ❖ Pareja tipo de célula no 3 (rango 850 nm-1300 nm)
- ❖ Pareja tipo de célula no 4 (rango 400 nm-850 nm)

### **Fuentes Ópticas**

- ❖ Láser Rojo (650 nm), Power Technology Inc
- ❖ Láser Verde (550 nm), Hero
- ❖ Diodo Led (850 nm), RatioPlast Optoelectronics

### **Medidores**

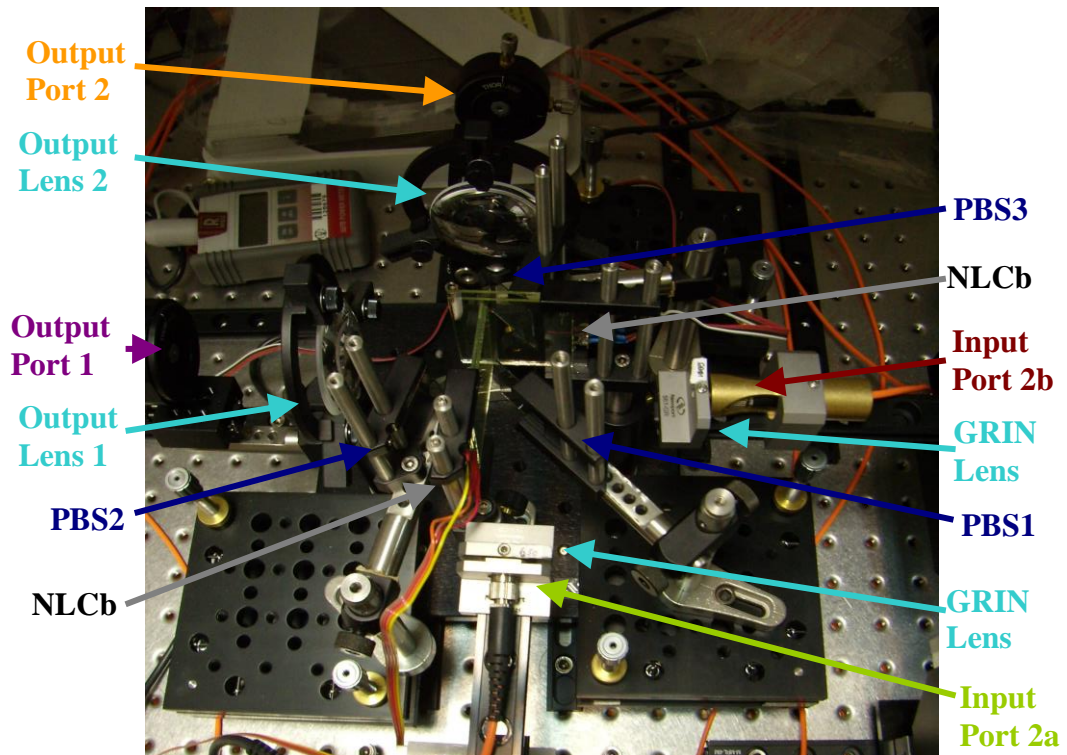
- ❖ Fotodetector de ganancia modelo PDA100A-EC

### **PBS**

- ❖ WGP PBS02A sin Recubrimiento Antirreflejante

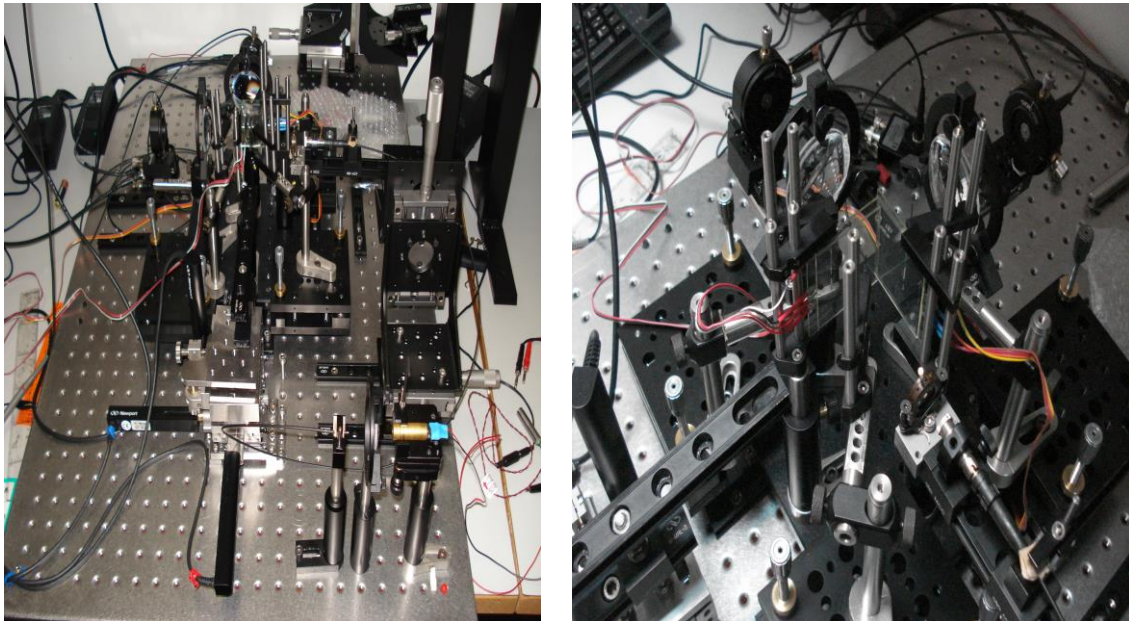
## **6.3 Montaje Experimental**

En este apartado, se presenta el montaje realizado en el banco de trabajo para el análisis y caracterización del conmutador óptico.



**Figura 6.2 Imagen del Conmutador Óptico realizado en el banco de trabajo.**

Como se puede apreciar en la imagen de la figura 6.2, [PeCL], se identifican con flechas todos los elementos del sistema. Así, para la entrada 1 se tiene el puerto denominado 2a y para la entrada 2 el puerto denominado 2b. Se pueden observar los 3 PBS, PBS1, PBS1 y PBS3, así como las 2 células de cristal líquido (NLCa y NLCb). Por otro lado, se identifican las lentes, a la entrada (lentes GRIN) que son lentes colimadoras y en las salidas (Output Lens 1 y 2) que son lentes que se encargan de hacer converger las diferentes componentes de polarización en las que han sido divididos, a su paso por el sistema, los rayos de luz incidentes en cada entrada. En la figura 6.3, se muestran diferentes vistas del sistema realizado en el banco de caracterización.



**Figura 6.3** Diferentes vistas del montaje realizado en el banco de caracterización.

Se trata de una arquitectura muy flexible, ya que permite ser utilizado a distintas longitudes de onda simplemente cambiando el tipo de elementos PBS y/o cristales líquidos, por modelos de los mismos que se ajusten más a la longitud de onda que se tenga en las entradas.

## **6.4 Resultados de Caracterización del Conmutador Óptico**

Para realizar la caracterización se emplearon las tres parejas de cristales líquidos nemáticos torsionados indicadas en el apartado 6.2. Cada pareja con unas características y propiedades diferentes a las otras. Para cada pareja de células de cristales se realizaron una tanda de mediciones para cada una de las tres longitudes de onda empleadas, 550 nm, 650 nm y 830 nm, es decir, tres tandas de valores para cada pareja de LC. Los modelos de PBS, las lentes a la entrada y la salida y los medidores de potencia en cada salida se mantuvieron para todas las longitudes de onda. Lo único que fue necesario cambiar, fue la fuente en cada caso y las parejas de cristal líquido. Como ya se ha comentado antes, sólo se realizó la caracterización para el píxel central de cada pareja de cristales.

Como se ha comentado, el conmutador propuesto en la parte inicial de este capítulo, es un conmutador avanzado y complejo que tiene varias funcionalidades, entre ellas la que se toma en cuenta en este proyecto, la de conmutador óptico 2x2. Su funcionamiento básico, como tal, se describe en la figura 6.4, [PeCL] donde se puede observar a la izquierda cuando el cristal líquido está en el estado OFF y a la derecha cuando se encuentra en el estado ON. Como entrada se utilizan el puerto 2 tanto de la entrada 1 (puerto 2a) como de la entrada 2 (puerto 2b), haciendo incidir las componentes de dichas entradas sobre el píxel central de cada célula de LC, y como salidas se tiene la salida 1 y 2.

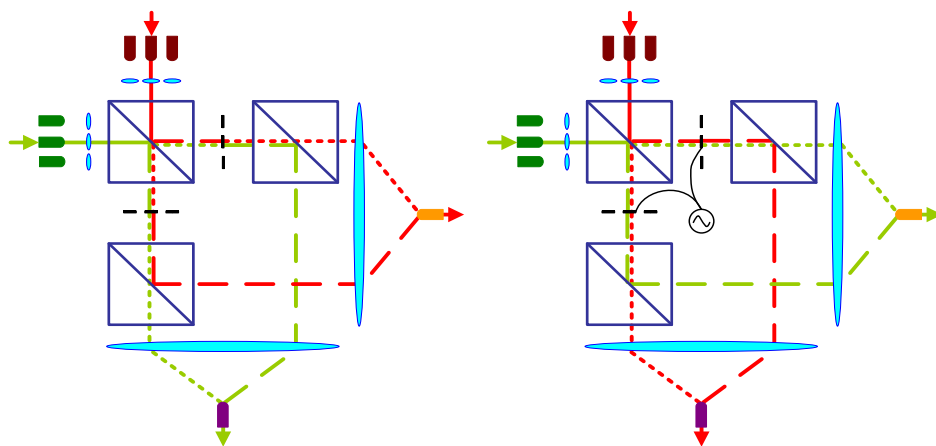
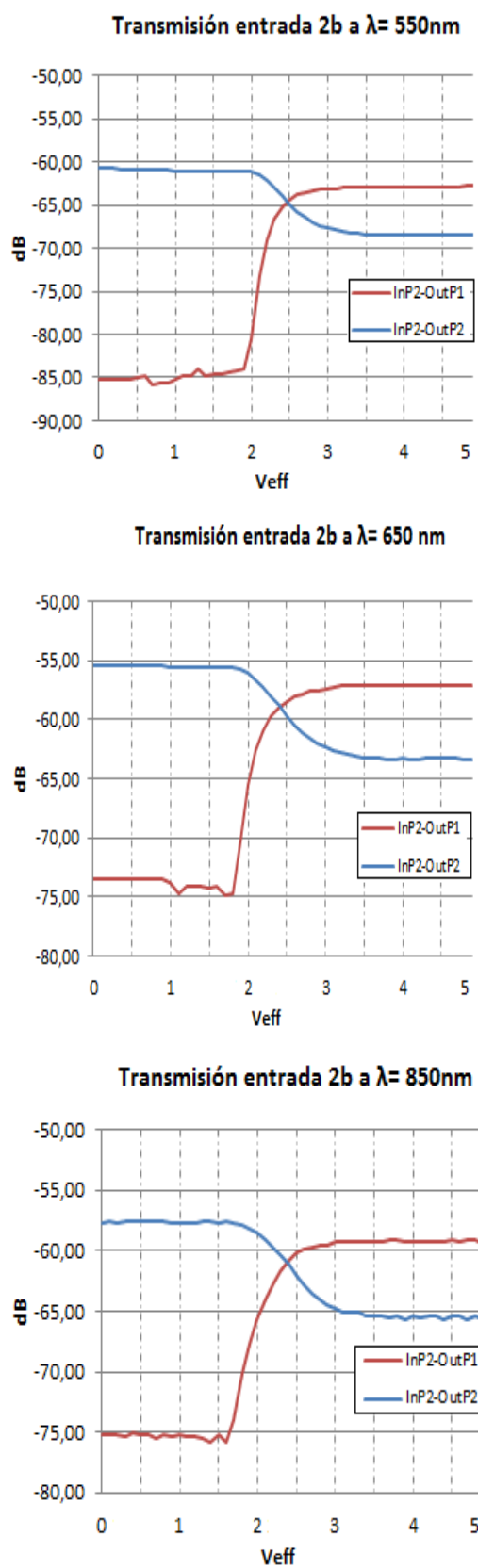


Figura 6.4 Función conmutador 2x2, en estados OFF y ON del LC.

### 6.4.1 Medidas con pareja células P2-P5

Esta pareja de células de cristal líquido se corresponde con las células denominadas tipo de célula no. 3 cuyo rango de longitudes de onda de trabajo es entre 850 nm-1300 nm. Las medidas fueron realizadas mediante un osciloscopio conectado al fotodetector PDA100A-EC (con 70 dB ganancia). Alimentando el sistema se encontraba un generador de onda configurado con una señal cuadrada de 10Khz de frecuencia a la que se le modificaba la amplitud de 0,2Vpp a 10Vpp (o lo que es lo mismo, de 0,1 Veff a 5 Veff) con pasos de 0,2V.



**Figura 6.5 Transmisión óptica célula n 3 puerto 2b y salidas 1 y 2 a diferentes frecuencias.**

En la figura 6.5, se tiene la respuesta en transmisión del píxel central del tipo de célula no. 3 cuando el puerto de entrada es el puerto 2b y las salidas son la salida 1 y 2. Como se puede apreciar, para todas las longitudes de onda, los valores de potencia obtenidos son más bajos de lo esperado, y la conmutación del cristal líquido se presenta entre los 2 Veff y 3 Veff, es decir, entre 4-6 Vpp.

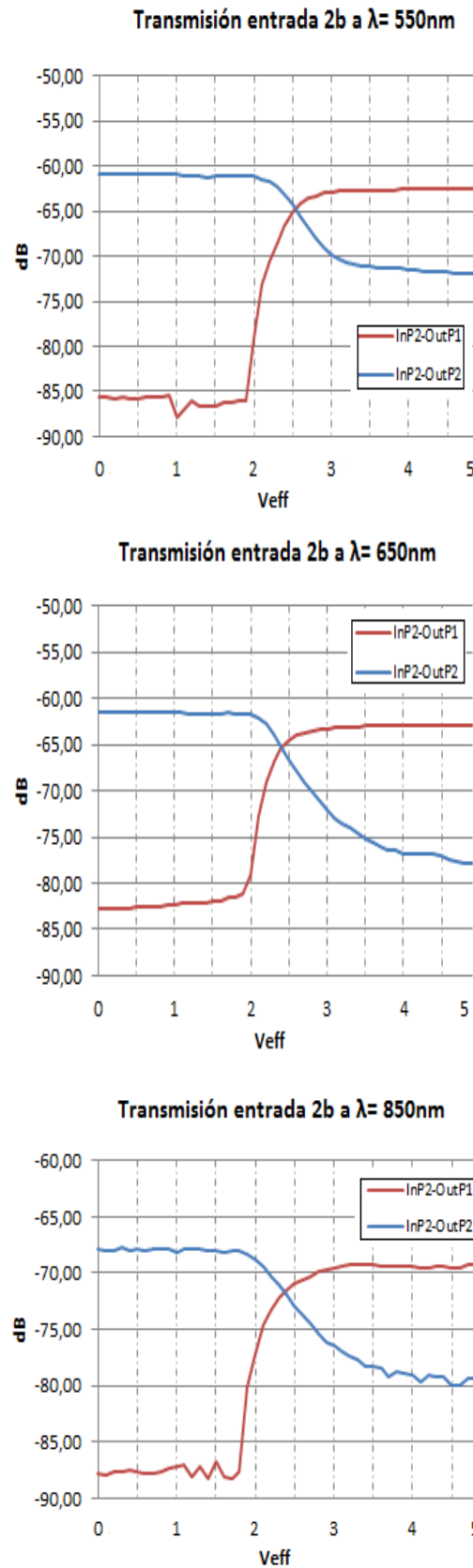
Puertos	Lambda 550 nm	Lambda 650 nm	Lambda 850 nm
InP2b-OutP1	23,00	17,78	16,78
InP2b-OutP2	7,79	7,96	8,06

**Tabla 6.2 CT tipo célula no 3 a distintas longitudes de onda.**

En la tabla 6.2, se presentan los valores de crosstalk en dB para las distintas longitudes de onda bajo estudio y cuando la entrada es el puerto 2b y las salidas son la 1 y la 2.

### **6.4.2 Medidas con pareja células P3-P8**

Esta pareja de células de cristal líquido se corresponde con las células denominadas tipo de célula no. 4 cuyo rango de longitudes de onda de trabajo es entre 400 nm-850 nm. Las medidas fueron realizadas mediante un osciloscopio conectado al fotodetector PDA100A-EC (con 70 dB ganancia). Alimentando el sistema se encontraba un generador de onda configurado con una señal cuadrada de 10Khz de frecuencia a la que se le modificaba la amplitud de 0,2Vpp a 10Vpp (o lo que es lo mismo, de 0,1 Veff a 5 Veff) con pasos de 0,2V.



**Figura 6.6 Transmisión óptica célula n 4 puerto 2b y salidas 1 y 2 a diferentes frecuencias.**

En la figura 6.6, se tiene la respuesta en transmisión del píxel central del tipo de célula no. 4 cuando el puerto de entrada es el puerto 2b y las salidas son la salida 1 y 2. Como se puede apreciar, para todas las longitudes de onda, los valores de potencia obtenidos son más bajos de lo esperado, y la conmutación del cristal líquido se presenta entre los 2 V<sub>eff</sub> y 3 V<sub>eff</sub>, es decir, entre 4-6 V<sub>pp</sub>.

En la tabla 6.3, se presentan los valores de crosstalk en dB para las distintas longitudes de onda bajo estudio y cuando la entrada es el puerto 2b y las salidas son la 1 y la 2.

Puertos	Lambda 550 nm	Lambda 650 nm	Lambda 850 nm
InP2b-OutP1	25,18	19,95	19,06
InP2b-OutP2	11,05	16,42	12,24

**Tabla 6.3 Crosstalk, tipo célula no. 4 a distintas longitudes de onda.**

Como se puede denotar, en este caso la célula tipo no. 4 presenta un crosstalk mayor para ambas salidas que para el tipo de célula no. 3.

### **6.4.3 Medidas con pareja células P1-P7**

Esta pareja de células de cristal líquido se corresponde con las células denominadas tipo de célula no. 1 cuyo rango de longitudes de onda de trabajo es entre 400 nm-1300 nm. Las medidas fueron realizadas mediante un osciloscopio conectado al fotodetector PDA100A-EC (con 60 dB ganancia para 550 m y 650 nm y con 50 dB ganancia para 850 nm). Alimentando el sistema se encontraba un generador de onda configurado con una señal cuadrada de 10Khz de frecuencia a la que se le modificaba la amplitud de 0,2V<sub>pp</sub> a 10V<sub>pp</sub> (o lo que es lo mismo, de 0,1 V<sub>eff</sub> a 5 V<sub>eff</sub>) con pasos de 0,2V.



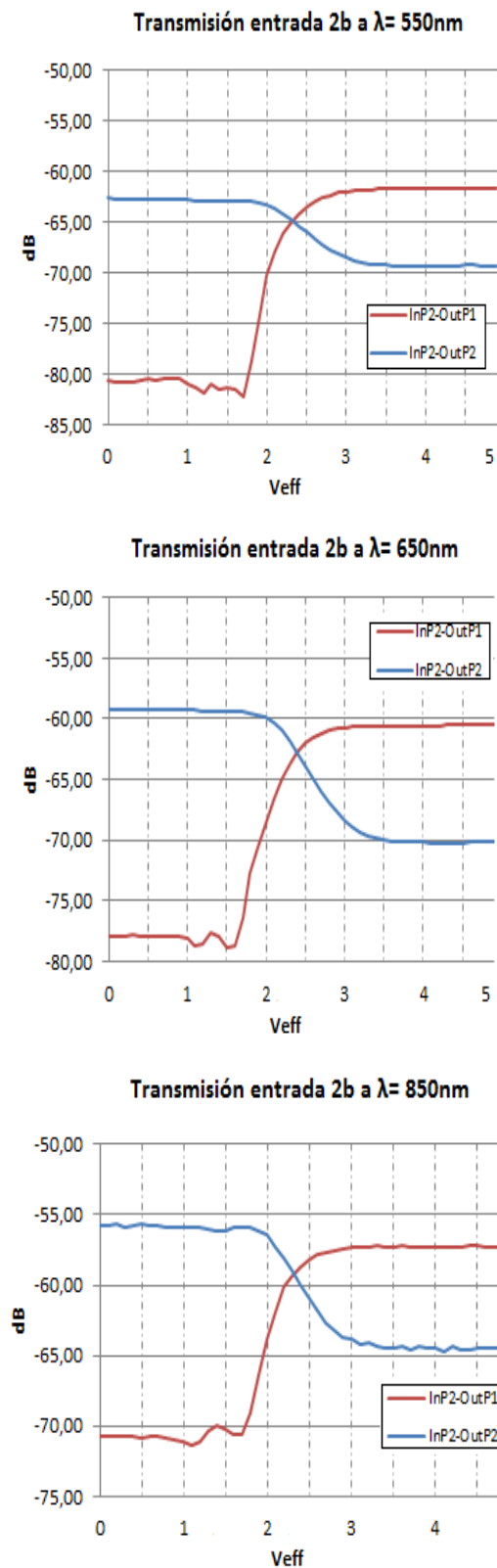


Figura 6.7 Transmisión óptica célula n 1 puerto 2b y salidas 1 y 2 a diferentes frecuencias.

En la figura 6.7, se tiene la respuesta en transmisión del píxel central del tipo de célula no. 1 cuando el puerto de entrada es el puerto 2b y las salidas son la salida 1 y 2. Como se puede apreciar, para todas las longitudes de onda, los valores de potencia obtenidos son más bajos de lo esperado, y la conmutación del LC se presenta entre los 2 Veff y 3 Veff, es decir, entre 4-6 Vpp.

Por otro lado, en la tabla 6.4, se presentan los valores de crosstalk en dB para las distintas longitudes de onda bajo estudio y cuando la entrada es el puerto 2b y las salidas son la 1 y la 2.

Puertos	Lambda 550 nm	Lambda 650 nm	Lambda 850 nm
InP2b-OutP1	20,63	18,38	14,14
InP2b-OutP2	6,79	10,97	9,00

**Tabla 6.4 Crosstalk tipo célula no 1 a distintas longitudes de onda.**

Revisando los valores para el crosstalk, se puede apreciar que la célula n1 presenta mejores valores de crosstalk que los otros tipos de células.

# 7. Conclusiones y Trabajos Futuros

## 7.1 Conclusiones

La conmutación óptica está siendo cada vez más importante en aplicaciones en las que la velocidad de transmisión es un factor determinante. Por esta razón, en las redes de telecomunicación existe una tendencia clara hacia sistemas totalmente ópticos que eviten los inconvenientes del paso óptico-eléctrico-óptico que hasta ahora se emplea. Para conseguir este objetivo, un elemento esencial es el dispositivo conmutador que, con una versión óptica, podría suponer un aumento de la capacidad de transmisión, aplicado tanto a redes de transporte como de acceso. Concretamente en estas últimas, de corto alcance y menor volumen de usuarios, son relevantes otras características como el coste o el espacio, lo que lleva al empleo de tecnologías como la de resonadores en anillo, que satisfacen estos requisitos.

En este proyecto, se ha presentado por una parte, un estudio a modo teórico de multitud de elementos ópticos, destacando la importancia de la fibra óptica de plástico y del resto de ellos en el presente y futuro de la conmutación y comunicaciones ópticas, y por otra parte, un estudio experimental mediante el cual se han caracterizado diferentes elementos ópticos a distintas longitudes de onda. Dicho estudio se ha basado en la materialización, en el laboratorio, de un banco de caracterización óptica que ha permitido llevar a cabo diversos montajes experimentales avanzados, dependiendo del elemento a analizar, y en la toma e interpretación de los datos arrojados por los diferentes elementos. Para concluir, se plantean los objetivos que han sido satisfactoriamente cumplidos, así como los resultados obtenidos:

- Se ha realizado un **análisis teórico** de múltiples elementos ópticos. Se ha introducido brevemente, el **estado del arte de los conmutadores ópticos** basados en cristal líquido.

- Se han **caracterizado cinco tipos de polarizadores**, todos distintos entre sí, para cuatro **longitudes de onda diferentes**, además empleando en ocasiones diversos tipos de fuentes y detectores ópticos a la salida.
- Se ha **determinado** cuales de estos polarizadores tienen un **mejor o peor comportamiento** a determinadas longitudes de onda en base a los valores de las **pérdidas de inserción**.
- Se han **caracterizado 4 tipos de divisores polarizadores de haz** o PBS, para cuatro longitudes de onda distintas. Se ha delimitado su **respuesta** a las **diferentes frecuencias** y se ha precisado cuáles de ellos son aptos para ser utilizados en unas o en otras.
- Se ha **caracterizado 1 pareja de cristal líquido nemático torsionado** (rango 850 nm-1300 nm), comprobando la respuesta de sus tres píxeles a la excitación recibida a la entrada mediante un láser rojo a 650 nm. Se ha comprobado su **comportamiento y su conmutación ON-OFF** en base a sus pérdidas de inserción y a la tensión introducida, respectivamente.
- Se ha **propuesto un conmutador óptico avanzado** con multitud de funciones. Se ha estudiado y **caracterizado para tres longitudes de onda** diferentes, midiendo la respuesta de su píxel central.

## 7.2 Trabajos Futuros

Como propuestas de trabajo futuro relacionadas con el presente proyecto se podría considerar:

- Reducir las dimensiones del conmutador para mejorar su integración en diversos sistemas de comunicaciones.
- Reducir las pérdidas de inserción y mejorar los valores de diafonía entre salidas



- Ampliar el rango de longitudes de onda de trabajo
- Emplear fibras ópticas de plástico de índice gradual
- Automatización de las medidas

# Referencias

[APT] Aníbal. R Figueiras, “Una Panorámica de las Telecomunicaciones”. Pearson Educación, 2002. Pág. 171-172.

[CCA] PFC Carlos García Argos. “Definición y evaluación de estrategias de encaminamiento multicamino para redes de conmutación de ráfagas ópticas”. Univ. Málaga. 2007. Pág. 18.

[TuN] Tutorial de comunicaciones ópticas. On line. Último acceso Abril 2014.  
[http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2\\_1\\_1.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_1_1.htm).

[ApCE] Apuntes asignatura de “Campos Electromagnéticos”. UC3M.

[FuH] Biblioteca Virtual de la Facultad de Física de la Universidad de la Habana.  
On line. Último acceso Abril 2014.  
[http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/fisica\\_aplicada/fisicaIII/tekct/refr.htm](http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/fisica_aplicada/fisicaIII/tekct/refr.htm)

[Sofh07] A.Méndez and T. F. Morse, “Specialty optical fibers handbook”. Academic Press, 2007 Pag. 19-65

[Focs02] G. Agrawal, “Fiber-optic communication systems 3rd ed.,” 2002. Capítulo 2.

[Ku07] M. G. Kuzyk, “Polymer Fiber Optics: Materials, Physics and Applications”. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

[SnLv] A. W. Snyder y J. D. Love, “Optical waveguide theory”. Chapman and Hall, 1983.

[ApMTO] Apuntes asignatura “Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos”.UC3M

[TEf] Tutorial “Introducción a la Fibra Óptica”. On line. Último acceso Junio 14  
<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Introduccion-fibra-optica.php>

[WiFO] Wikipedia. Fibra Óptica. On line. Último acceso Junio 2014  
<http://es.wikipedia.org/>

[APT02] Aníbal. R Figueiras, “Una Panorámica de las Telecomunicaciones”. Pearson Educación, 2002. Pág. 171-179.

[ApMT] Apuntes asignatura “Medios de Transmisión”. UC3M

[Cap98] J.Capmany,F.J Fraile-Peláez y J.Martí, “Fundamentos de Comunicaciones Ópticas”. Síntesis, 1998.

[Ofc07] Arup Polley, Rohan J. Gandhi, and Stephen E. Ralph. “40Gbps Links Using Plastic Optical Fiber”. Optical Fiber Communications Conference, 2007.

[JLT10] H. Yang, S. C. J. Lee, E. Tangdionga, C. Okonkwo, H. P. A. van den Boom, F. Breyer, S. Randel y A. M. J. Koonen. “47.4 Gb/s transmission over 100 m graded-index plastic optical fiber based on rate-adaptative discrete multitone modulation”. Journal of Lightwave Technology, vol. 28, no 4, 2010.

[JianYu] Jianjun Yu (2009). “Application of Graded-Index Plastic Optical Fiber in Broadband Access Networks”. Optical Fiber New Developments, Christophe Lethien (Ed.), ISBN: 978-953-7619-50-3, InTech.

[iFO] Compañía Industrial Fiber Optics, Inc. On line. Último acceso Septiembre 2014  
<http://i-fiberoptics.com/multi-core-fiber-cable.php>

[ZuA01] J. Zubia y J. Arrue. “Plastic Optical Fibers: An Introduction to their Technological Processes and Applications”. 2001. Optical Fiber Technology 7. Pág. 101-140.

**[FOhoy]** Fibra Óptica hoy. On line. Último acceso Septiembre 2014  
[www.fibraopticahoy.com](http://www.fibraopticahoy.com)

**[MostCo]** Most Cooperation On line. Último acceso Octubre 2014  
<http://www.mostcooperation.com>

**[Ciocan]** C. Ciocan. “The Domestic Digital Bus system (D2B)-a maximum of control convenience in audio video” IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 36, no 3, pp. 619-622, 1990.

**[CON95]** Francisco Ramos Pascual. “Fibra óptica de plástico para comunicaciones de datos”. Artículo de la revista CONECTRONICA, nº 95 y <http://www.radioptica.com/>

**[Dpar]** Dominique Paret. “Multiplexed Networks for Embedded Systems: CAN, LIN, FlexRay, Safe-by-Wire....” John Wiley & Sons, 2007. Cap. 10.

**[Nes09]** A.Nespola, S.Abrate, R. Gaudino, B. Offenbeck, J. Sundermeyer, C.Zerna, N.Weber. “In-building and home networks using POF” project POF-PLUS, 2009.

**[LuV]** Apuntes de Docencia de la Universidad de Vigo. On line. Último acceso Septiembre 14  
[http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.10/restringido/Explicaciones/FAv04\\_Explicacion.pdf](http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.10/restringido/Explicaciones/FAv04_Explicacion.pdf)

**[Op02]** Eugene Hecht. “Optics”. Addison-Wesley, 2002. Cap.8

**[Fpol]** Filtro polarizador. On line. Último acceso Octubre 2014  
<http://aficionadosalafotografia.com/el-filtro-polarizador-como-funciona/>

**[ApOp]** Compañía Api American Polarizers. On line. Último acceso Noviembre 2014  
<http://www.apioptics.com/linear-polarizers.html>

**[Hard]** Enlace a través de la Universidad de Harvard. On line. Último acceso Noviembre 2014. [http://sites.fas.harvard.edu/~phys191r/Bench\\_Notes/A9/PBS.pdf](http://sites.fas.harvard.edu/~phys191r/Bench_Notes/A9/PBS.pdf)



**[ShO]** Compañía Showa Optronics. On line. Último acceso Marzo 2013.

<http://www.soc-ltd.co.jp/en>

**[DiIn]** Compañía Direct Industry. On line. Ultimo acceso Marzo 2013

<http://www.directindustry.com/prod/eksma-optics/block-type-separators-polarizing-optical-beam-57692-596302.html>

**[DMpbs]** Guanliang Peng, Ruiquan Ye, Jiankun Yang, Shengli Chang, Juncai Yang

“Design of MacNeille Polarizing Beam Splitter”. On line. Último acceso Octubre 2014

<http://ieeexplore.ieee.org/strauss.uc3m.es:8080/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5230109>

**[EdO]** Compañía Edmund Optics. On line. Último acceso Octubre 2014

<http://www.edmundoptics.com/optics/beamsplitters/polarizing-beamsplitters/>

**[LenUA]** Universidad de Alicante. Docencia. On line. Último acceso Diciembre 2014

<http://www.ua.es/personal/mj.caturla/Curso0/Leccion-10.pdf>

**[Tfo]** “Tópicos de física.Óptica”. On line. Último acceso Diciembre 2014

<http://www.monografias.com/trabajos93/topicos-selectos-fisica-optica/topicos-selectos-fisica-optica.shtml>

**[Elc]** Espacio de la ciencia. Cristales líquidos. On line. Diciembre 2014

<http://espaciodelaciencia.blogspot.com.es/2010/08/cristales-liquidos.html>

**[UniAl]** Universidad de Alicante. On line. Último acceso Diciembre 2014

<http://web.ua.es/es/actualidad-universitaria/2010/octubre2010-18-24/la-universidad-de-alicante-busca-dominar-la-luz-con-cristal-liquido.html>

**[Bidg]** Biblioteca digital. Cristales líquidos. On line. Último acceso Diciembre 2014

[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/104/htm/sec\\_6.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/104/htm/sec_6.htm)

[Unizar] Universidad de Zaragoza. Instituto de ciencia de materiales de Aragón. On line. Último acceso Diciembre 2014

<http://www.unizar.es/icma/divulgacion/cristalesliq.html>

[ToW03] Tomasi, Wayne. “Sistemas de Comunicaciones Electrónicas”. Pearson Educación, 2003. Pág.452-462

[Lpub] Light-Emitting Diodes. On line. Último acceso Octubre 2014

<http://www.tpub.com/neets/tm/110-4.htm>

[MoL] Monografías. LED. On line. Último acceso Octubre 2014

<http://www.monografias.com/trabajos60/diodo-led/diodo-led.shtml>

[Uclm] Universidad Castilla la Mancha. Optoelectrónica. On line. Último acceso Octubre 2014

<http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/Componentes/OPTOELECTRONICA.html#6546>

[Bhat94] Bhattacharya, Pallab. “Semiconductor optoelectronic devices”. Prentice-Hall, 1994. Cap. 8.

[Duch05] Duchowicz, Ricardo. N, Sergio “Intercomunicador por fibra óptica” Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2005. On line. Último acceso Noviembre 2014

<http://www.entrierios.gov.ar/CGE/2010/tecnica/files/2011/09/4INTERCOMUNICADOR-C.pdf>

[Lacy93] Robert J. Hoss,Edward A. Lacy. “Fiber Optics”. Prentice-Hall,1993. Cap 8.7

[PeCL] PhD Thesis Pedro Contreras Lallana. “Advanced Devices Based on Fibers, integrated optics and liquid crystals por WDM Networks”. UC3M. 2011.

[Chua10] S Chua; B Li. “Optical Switches materials and design”, Woodhead Publishing, October 28, 2010. Cap 8.